

Département de géomatique appliquée  
Faculté des lettres et sciences humaines  
Université de Sherbrooke

---

**Analyse de la microstructure du manteau neigeux pour la modélisation de l'émission micro-onde de  
la neige saisonnière sub-arctique**

Mémoire présenté pour l'obtention du grade de Maître ès sciences (M. Sc.),  
cheminement recherche en télédétection

Décembre 2018  
©Olivier Saint-Jean Rondeau

## **Identification du jury**

### **Directeur de recherche :**

Dr. Alain Royer, Professeur titulaire, Département de géomatique appliquée, Faculté des lettres et sciences humaines,  
Université de Sherbrooke

### **Co-directeur de recherche :**

Dr. Alexandre Langlois, Professeur agrégé, Département de géomatique appliquée, Faculté des lettres et sciences  
humaines, Université de Sherbrooke

### **Lecteur externe :**

Benoît Montpetit, Scientifique de la télédétection des changements climatiques, National Wildlife Research Center,  
Environment and Climate Change Canada

### **Lecteur interne :**

Hardy Granberg, Professeur associé, Département de géomatique appliquée, Faculté des lettres et sciences humaines,  
Université de Sherbrooke

## Résumé

La neige joue un rôle important dans l'hydrologie canadienne et change rapidement dans le contexte des changements climatiques. L'utilisation de la télédétection dans le domaine des micro-ondes passives (MOP) est l'une des approches communément employées pour le suivi de l'état du manteau neigeux saisonnier sur une échelle synoptique. La modélisation de la température de brillance ( $T_B$ ) dans les micro-ondes (de 1 à 100 GHz) émise par le manteau neigeux est possible par l'utilisation de modèles physiques tel que le modèle Dense Media Radiative Transfert Model - MultiLayer (DMRT-ML) qui prend compte des propriétés microstructurales de la neige. Une paramétrisation adéquate de cette microstructure, à l'aide de profils verticaux de densité, de taille de grain de neige et d'un paramètre de cohésion (stickiness) reste difficile sur le terrain et doit être optimisée de façon à minimiser les erreurs de modélisation.

Les expériences effectuées dans le cadre de cette maîtrise ont pour but d'optimiser le modèle DMRT-ML dans les conditions de neiges subarctiques canadiennes, et d'améliorer la paramétrisation de la microstructure sur le terrain. Pour arriver à ces fins, le mémoire est divisé en deux parties. La première vise à évaluer le potentiel d'utilisation d'un micro-pénétrromètre, le Snow Micro-Penetrometer (SMP), pour la détermination de la microstructure de la neige dans le modèle DMRT-ML. Il est démontré que les données issues de cet instrument permettent de simuler l'émission micro-onde de la neige ( $T_B$ ) avec une précision comparable, voir meilleure, que l'approche traditionnelle (par stratigraphie de la neige), en comparaison aux mesures radiométriques de la neige faites simultanément. À 37 GHz, l'amélioration est plus significative (-5 K, -25%) qu'à 10 et 19 GHz. Nos résultats confirment aussi que le modèle DMRT-ML doit être calé par un facteur  $\Phi$  sur le rayon optique des grains dérivé de la SSA pour minimiser l'erreur sur les simulations de  $T_B$ . Ce facteur est de 3.8 si l'on prend les mesures in-situ de SSA et densité et de 2.2 si l'on dérive la SSA et la densité du SMP. Ces résultats montrent le potentiel de l'utilisation du SMP pour mesurer les caractéristiques de la microstructure pour les modèles de transfert radiatif. Ces mesures sont également plus rapides et pratiques à effectuer sur le terrain.

La seconde partie présente les résultats d'une expérience de caractérisation des propriétés radiométriques de couches homogènes en densité et taille des grains (définie par leur surface spécifique) extraites du manteau neigeux. Ces couches de neige, isolées dans une boîte, sont posées successivement sur un substrat absorbant puis réfléchissant pour leur caractérisation à l'aide de radiomètres polarisés opérant aux fréquences de 10, 19, 37 et 89 GHz. Cette manipulation nous permet de dériver les coefficients de diffusion et d'absorption effectifs de chaque couche de neige, et de les comparer aux propriétés microstructurales spécifiques à chaque échantillon. Ainsi, la relation entre la longueur de corrélation des grains de neige et le

coefficient de diffusion des micro-ondes est obtenue pour chaque fréquence, ce qui nous permet également de comparer la dépendance fréquentielle à des valeurs provenant de la littérature. Nos résultats ont montré que la longueur de corrélation radiométrique ou effective doit être pondérée par un facteur de l'ordre de 1.2 – 1.3 par rapport à la relation théorique de Debye. Ce résultat est discuté par rapport aux relations établies à partir de mesures de structure de la neige réalisées par micro-tomographie donnant un facteur plus faible de 0.75. Nos résultats sur l'inversion des coefficients de diffusion et d'absorption de la neige en utilisant un modèle simplifié à 6-flux ont été comparés à la théorie de diffusion de Rayleigh montrant des coefficients beaucoup plus faibles que ceux attendus (dépendance fréquentielle de 2 au lieu de 4 par exemple, mais en accord avec des études précédentes). La relation entre le coefficient de diffusion inversé et la longueur de corrélation (en mode log-log) montre une pente plus faible que la pente théorique de 3 attendue selon la diffusion de Rayleigh et aussi plus faible que celles observées par précédentes études similaires, soit entre 0.74 et 1.23 pour cette étude au lieu de 0.84 à 0.96 (Touré et al., 2009[56]) ou 2.91 et 3.13 (Weismann et al. 1998 [61]).



## Abstract

Monitoring the snowpack is critical for understanding Canadian hydrology in the context of climate change. Passive microwave (PMW) remote sensing has proved to be the most practical approach in characterizing the seasonal snowpack of remote northern regions at the synoptic scale. Modeling emitted microwave brightness temperature (1 to 100 GHz) is made possible by the use of physical radiative transfer model such as the Dense Media Radiative Transfer Model - MultiLayer (DMRT-ML), that takes into account microstructural and stratigraphic structure of the snowpack. However, a reliable evaluation of this microstructure, including the vertical profile of density, grain size and stickiness parameters, remains difficult on the field and must be optimized in order to eliminate modeling errors and biases.

The experiments undertaken in the framework of this master's degree aim at optimizing the model DMRT-ML in Canadian subarctic snow conditions, and at improving the parametrization of the microstructure in the field. The thesis is divided into two parts : The first focuses on the evaluation of the use of a swiss instrument, the Snow Micro-Penetrometer (SMP), to measure snow microstructure as an input for DMRT-ML. We demonstrate, using surface-based radiometers as reference, that this method provides the necessary parameters to model snowpack microwave emission with DMRT-ML with high reliability, compared to traditional method (stratigraphy in a snowpit). The errors of the model were significantly improved at 37 GHz (-5 K, -25%) but did not change significantly at 10 and 19 GHz. Our results show that DMRT-ML needs a scaling factor  $\Phi$  on the optical radius of snow grains derived from SSA in order to minimize the error on  $T_B$  simulations. This factor was evaluated at 3.8 for in-situ SSA and density and 2.2 if we derive the SSA and density from the SMP. These results indicate a good potential to use the SMP device to measure the characteristics of snow microstructure for microwave transfer models. This measurement is also much faster and practical to use on the field.

The second part presents the results of the characterization of microwave properties of homogeneous layers of snow. Measurements of density and grain size (as defined by the specific surface area) were realized within each sample extracted as strata from the snow cover. These homogeneous snow samples were selected in a transparent box and successively placed on an absorbing and reflective substrate. Radiometers operating at 10, 19, 37 and 89 GHz were used to measure the brightness temperature ( $T_B$ ) and polarisation of these samples. This process allows to determine scattering and absorption coefficients of each sample and compare results to microstructural properties of each sample. Scattering coefficient was related to correlation length of snow grains via regressions for each frequency, allowing comparison of frequency dependance to literature values. The effect of snow grain classification on radiometric properties was also highlighted by

the analysis. The results confirm the necessity of adjusting the snow grain size by a correction coefficient in order to minimize the error in simulation of snow microwave emission. Our results indicate that the effective correlation length needs to be adjusted by a factor of 1.2 – 1.3 to correspond to the theoretical Debye relation. This result is compared to values obtained from microtomography scans of snow grains for which the optimal factor was 0.75. Scattering and absorption coefficients were inverted using a simplified 6-flux radiative transfer model. Resulting coefficients were much smaller than expected when compared to the Rayleigh diffusion theory. The exponent in the frequential dependance of our results was on the order of 2 instead of 4, which is approximately in agreement with some previous studies. The comparison between inverted scattering coefficients and the correlation length in log-log representation gives a slope much smaller than the value of 3 expected by the Rayleigh diffusion, but also smaller than the values observed in similar studies. Our results go from 0.74 to 1.23 as compared to values of 0.84 to 0.96 (Touré et al., 2009[56]) or 2.91 to 3.13 (Weismann et al. 1998[61]).

# Table des matières

<b>1</b>	<b>Introduction</b>	<b>1</b>
1.1	Contexte	1
1.2	Problématique	2
1.3	Objectifs et hypothèses	3
1.3.1	Expérience SMP-DMRT	4
1.3.2	Expériences de caractérisation des couches homogènes	5
1.4	Plan de thèse	5
<b>2</b>	<b>Contexte théorique</b>	<b>6</b>
2.1	La physique de l'interaction des micro-ondes dans un manteau neigeux	6
2.2	La modélisation du transfert radiatif	7
2.3	Paramètres de microstructure de la neige	9
<b>3</b>	<b>Expérience SMP-DMRT</b>	<b>11</b>
3.1	Méthode	11
3.1.1	Sites d'étude et données	11
3.1.2	Description des mesures radiométriques	12
3.1.3	Données et traitement SMP	13
3.1.3.1	Sélection des profils	14
3.1.3.2	Calculs de la microstructure à partir des mesures SMP	14
3.1.4	Organigramme méthodologique	14
3.1.5	Facteur de minimisation de l'erreur de simulation	16
3.2	Résultats de l'expérience SMP-DMRT	18
3.2.1	Comparaison des stratigraphies manuelles et SMP pour la densité et le rayon optique	18
3.2.2	Analyse des $T_B$ simulés pour des profils d'intrants à 5 cm	20
3.2.3	Analyse de l'épaisseur de la couche SMP optimale	23
3.3	Discussion	24

<b>4</b>	<b>Expérience de caractérisation des couches de neige homogènes</b>	<b>25</b>
4.1	Méthode . . . . .	25
4.1.1	Données de l'expérience couche . . . . .	25
4.1.2	Caractérisation radiométrique des couches . . . . .	27
4.2	Vérification de la validité des mesures radiométriques . . . . .	29
4.2.1	Effet de l'atmosphère . . . . .	29
4.2.2	Effet de la couche de polystyrène mesurée sur l'absorbeur . . . . .	29
4.2.3	Effet de la couche de polystyrène mesurée sur la plaque réfléchissante . . . . .	30
4.2.4	Conclusion sur la validité des mesures radiométriques par couche . . . . .	32
4.3	Modèles d'inversion . . . . .	33
4.3.1	Méthodologie d'inversion de la longueur de corrélation effective . . . . .	33
4.3.2	Méthodologie d'inversion des coefficients d'absorption et de diffusion avec la méthode du sandwich . . . . .	34
4.4	Résultats des analyses par couche . . . . .	36
4.4.1	Longueur de corrélation . . . . .	36
4.4.2	Coefficients de diffusion de la neige par couche . . . . .	38
4.5	Discussion . . . . .	42
<b>5</b>	<b>Conclusion</b>	<b>44</b>
<b>6</b>	<b>Annexe</b>	<b>52</b>
6.1	Tableaux et figures relatives aux données utilisées . . . . .	52
6.2	Complément de résultats des mesures des coefficients de diffusion inversés . . . . .	67
6.3	Complément de résultats des mesures des coefficients d'absorption inversés . . . . .	71
<b>7</b>	<b>Complément d'information sur les instruments utilisés</b>	<b>77</b>
7.1	Les radiomètres . . . . .	77
7.2	Le SMP . . . . .	78
7.2.1	Description de l'appareil . . . . .	78
7.2.2	Calcul des paramètres microstructuraux . . . . .	79
7.3	IRIS . . . . .	82

## Table des figures

1	Schéma du transfert radiatif . . . . .	8
2	Carte des sites de mesures . . . . .	12
3	Profil des couches de neige réalisé à la Baie James en Février 2015. . . . .	13
4	Exemple d'une mesure éliminée lors de la procédure de tri . . . . .	15
5	Organigramme méthodologique . . . . .	16
6	Courbes d'optimisation pour le paramètre $\Phi$ . . . . .	17
7	Comparaison à l'aide de diagrammes de dispersion pour les paramètres SMP et manuels . . . . .	20
8	Comparaison des mesures au SMP et manuelles de la densité et du rayon optique . . . . .	20
9	Comparaison des $T_B$ simulées avec les températures de brillance mesurées . . . . .	21
10	Effet d'un changement de l'épaisseur des couches entre 5 et 1 cm . . . . .	23
11	Prélèvement d'une couche homogène dans le manteau neigeux . . . . .	27
12	Schéma de la mesure radiométrique effectuée sur une couche . . . . .	28
13	Comparaison entre les $T_{B \text{ sky}}$ et $T_{B \text{ Down}}$ . . . . .	30
14	Comparaison entre les $T_B$ pour l'absorbeur . . . . .	31
15	Différence de $T_B$ causée par la présence du polystyrène . . . . .	32
16	Démonstration de l'inversion du paramètre de longueur de corrélation L . . . . .	35
17	Relation entre la Lcorr exponentielle et Lcorr de la relation de Debye . . . . .	37
18	Relation entre la longueur de corrélation exponentielle obtenue au $\mu\text{CT}$ $L_{TOMO}$ . . . . .	37
19	Légende des figures . . . . .	38
20	Coefficient de diffusion inversé des couches en fonction du $R_{opt}$ . . . . .	39
21	Coefficient de diffusion inversé des couches en fonction du $R_{opt}$ . . . . .	40
22	Relation le coefficient de diffusion et la longueur de corrélation $L_{exp}$ . . . . .	40
23	Dépendance spectrale des coefficients de diffusions . . . . .	42
24	Bilan du snowpit du site Morex1-SP1. . . . .	53
25	Bilan du snowpit du site Morex1-SP2. . . . .	54
26	Bilan du snowpit du site Morex1-SP3. . . . .	54
27	Bilan du snowpit du site Morex2-SP1. . . . .	55
28	Bilan du snowpit du site Morex2-SP2. . . . .	55
29	Bilan du snowpit du site Morex3-SP1. . . . .	56

30	Bilan du snowpit du site UMI-SP1. . . . .	57
31	Bilan du snowpit du site UMI-SP2. . . . .	57
32	Bilan du snowpit du site UMI-SP3. . . . .	58
33	Bilan du snowpit du site UMI-SP4. . . . .	58
34	Bilan du snowpit du site UMI-SP5. . . . .	59
35	Bilan du snowpit du site UMI-SP6. . . . .	59
36	Graphique reliant le $R_{IRIS}$ aux coefficients de diffusion . . . . .	68
37	Graphiques reliant $\rho_{couteau}$ aux coefficients de diffusion . . . . .	69
38	Graphiques des coefficients de diffusion . . . . .	70
39	Graphique reliant le $R_{IRIS}$ aux coefficients d'absorption . . . . .	72
40	Graphiques reliant $\rho_{couteau}$ aux coefficients d'absorption . . . . .	73
41	Graphiques des coefficients d'absorption . . . . .	74
42	Photographies des différents types de grains . . . . .	75
43	Comparaison des $T_B$ simulées avec les températures de brillance mesurées . . . . .	76
44	Les dimensions du champ de vision maximal des radiomètres sont indiquées dans ce graphique. On démontre par le calcul que la couche de neige étudiée de 60 par 70 cm était plus grande que le champs de vision du radiomètre. . . . .	77
45	Photographie de l'appareil SMP . . . . .	78
46	L'appareil SMP pour une caractérisation de la microstructure de façon mécanique . . . . .	80
47	Photographie de l'appareil IRIS1 . . . . .	82

## Liste des tableaux

1	Sites d'études rassemblant les mesures nécessaires pour l'objectif 1. . . . .	11
2	Statistiques de la comparaison de $\rho_{SMP}$ par rapport à $\rho_{couteau}$ (voir Fig. 7a ) . . . . .	19
3	Statistiques pour la comparaison de $R_{SMP}$ par rapport à $R_{IRIS}$ (voir Fig. 7b ) . . . . .	19
4	Propriétés statistiques de modélisation pour le $\Phi_0$ (couche de 5 cm) . . . . .	21
5	Erreurs de simulation selon le pas d'échantillonnage (épaisseur des couches) pour $R_{IRIS}$ et $\rho_{SMP}$ . . . . .	24
6	Sites de mesure de l'expérience couche pour les campagnes de 2016 et 2017 . . . . .	26
7	Exemple de mesures des propriétés radiométriques d'une couche . . . . .	27
8	Valeurs du coefficient de réflexion du polystyrène $\gamma_{sty}$ . . . . .	31
9	Paramètres de régression comparés avec les résultats de Wiesmann et de Touré . . . . .	41
10	Données de la Campagne Janvier BJ2015 . . . . .	52
11	Données de la Campagne Février BJ2015 . . . . .	52
12	Snowpits des campagnes de 2016 . . . . .	53
13	Caractéristiques des couches : Tableau 1 . . . . .	60
14	Caractéristiques des couches : Tableau 2 . . . . .	61
15	Caractéristiques des couches : Tableau 3 . . . . .	62
16	Propriétés radiométriques des couches pour la campagne Morex1 . . . . .	63
17	Propriétés radiométriques des couches pour la campagne Morex2 et Morex3 . . . . .	64
18	Propriétés radiométriques des couches pour la campagne de Umiujaq 2016, partie 1 . . . . .	65
19	Propriétés radiométriques des couches pour la campagne de Umiujaq 2016, partie 2 . . . . .	66
20	Propriétés statistiques de modélisation pour le $\Phi_0$ (couche de 5 cm) avec $\rho_{SMPcalib}$ . . . . .	76

## REMERCIEMENTS

Je désire remercier mon directeur, Alain Royer, pour sa confiance, son soutien et pour sa passion constante pour la science tout au long de ce projet de recherche. Je voudrais remercier Alexandre Roy qui a été d'une grande assistance et d'une compagnie très agréable pour mes questions et le travail au quotidien. Je voudrais également remercier mon codirecteur Alexandre Langlois pour son modèle de pragmatisme qui ramenait nos spéculations de physiciens dans le monde concret. Jean-Benoît Madore a également été d'une aide très présente pour collaborer sur différents sujets et planter un jardin à la station expérimentale.

Je désire remercier les relecteurs du mémoire, Benoît Montpetit et Hardy Granberg, pour leur attention et leurs conseils judicieux.

Je voudrais également saluer toute l'équipe du GRIMP qui ont été des compagnons de terrain formidables et qui ont rendu mon séjour dans les bureaux de l'université beaucoup plus intéressant.

Un mot également pour remercier les institutions sans lesquelles ce projet n'aurait pas été possible ; C'est grâce aux bourses du CRSNG et du FQRNT que j'ai pu me consacrer à travailler sur ces projets, et je voudrais également remercier le réseau du Centre d'Études Nordiques qui a facilité notre participation à des conférences et a contribué à rendre possible ces expéditions dans le grand nord.

Bien que mon parcours jusqu'à la fin de cette maîtrise ait été tortueux en raison de mes intérêts divergents reliant la science collaborative et l'anthropologie au cadre plus restreint de la géophysique, je veux exprimer ma gratitude envers le fait d'avoir été plongé dans ce milieu extrêmement enrichissant et d'avoir vécu des expériences inoubliables dans la nature et avec les humains. La réalisation de cette maîtrise m'a permis de découvrir ma passion pour les sciences de l'environnement, pour la construction du réseau système sensoriel de notre mère Terre, que nous devons impérativement développer et amener dans le quotidien de la majorité des habitants de cette planète pour faciliter la transition écologique qui est plus que nécessaire à l'heure actuelle.

Merci de m'avoir donné une occasion de participer à cette aventure !

Olivier



# 1 Introduction

## 1.1 Contexte

La compréhension de l'état du manteau neigeux recouvrant les régions arctiques et subarctiques est importante pour le suivi des effets des changements climatiques et la modélisation des processus hydrologiques au Canada (consulter la synthèse bibliographique sur cette problématique, rassemblée dans le document SWIPA (Snow, Water, Ice and Permafrost in the Arctic), 2017 [1], disponible en ligne ; et Brown et al., [4] Derksen et al.[14]).

La mesure multi-spectrale de l'émissivité de la surface terrestre dans le spectre micro-onde à l'aide de radiomètres imageurs satellitaires constitue à ce jour l'une des méthodes les plus efficaces pour caractériser l'évolution quotidienne de la neige saisonnière à une échelle synoptique (Derksen et al.,[13]). La signature électromagnétique du manteau neigeux est liée aux phénomènes d'émission, d'absorption et de diffusion des radiations qui le traversent. Ces propriétés électromagnétiques dépendent de la microstructure de la neige (Löwe and Picard, 2015[25]) et de l'équivalent en eau de la neige (EEN) (Mätzler, 1994[27] ; Kelly et al., 2003[19] ; Mätzler et al., 2006[31]). La microstructure de la neige est définie comme l'ensemble des variations tridimensionnelles de densité, de taille des grains et de la forme des agglomérats de grains de neige, qui varie temporellement et spatialement en fonction des précipitations et du climat (eg. Flanner et Zender, 2006 [18] ; Löwe et Picard, 2015 [25] ; Krol et Löwe, 2016 [21]). La paramétrisation de cette microstructure de la neige dans le contexte de l'émission micro-onde est un problème toujours d'actualité.

Depuis la mise en fonction des premiers radiomètres imageurs satellitaires en orbite terrestre en 1978 avec SMMR (Scanning Multichannel Microwave Radiometer), des algorithmes ont été développés pour analyser la cryosphère et les propriétés de la neige, visant en particulier la mesure de l'EEN à partir des observations spatiales (Chang and Foster, 1982[8]). Pour améliorer ces algorithmes qui sont affectés par la taille et les propriétés des grains de neige, plusieurs modèles de transfert radiatif ont été développés dans le but de mieux modéliser la  $T_B$  d'un sol couvert d'un manteau neigeux. Certains modèles décrivent les interactions des radiations électromagnétiques micro-ondes avec le manteau neigeux en utilisant des approches empiriques, c'est à dire en inversant les coefficients des relations de mesures expérimentales pour décrire le comportement électromagnétique dans la neige : le modèle Helsinki University of Technology snow model (HUT) développé par Pulliainen et al., 1999[44] ainsi que la première implémentation du modèle Microwave Emission Model of Layered Snowpacks (MEMLS) développé par Wiesmann and Mätzler, 1999[60] sont de ce type. D'autres approches se basent sur des modèles mathématiques statistiques pour représenter physique-

ment l'interaction des ondes électromagnétiques avec les grains de neige : Dense Media Radiative Transfer Model (DMRT), tel que formulé par Tsang et al., 2000[57] ; Improved Born Approximation (IBA) est proposé par Mätzler et al., 1998 [29] ; Quasi-Crystalline Approximation Mie scattering of Sticky spheres (QMS) est décrit par Chang et al., 2014[10]. Ces approches de modélisation ont été incorporées dans différents modèles permettant de représenter le transfert radiatif à travers les nombreuses couches superposées qui constituent un manteau neigeux, dont les plus notables actuellement sont Dense Media Radiative Transfer - Multi-Layer model (DMRT-ML), Picard et al., 2013[38], Dense Media Radiative Transfer - Quasi-Crystalline Approximation Mie scattering of Sticky spheres (DMRT-QMS), Chang et al., 2016[9], Helsinki University of Technology n-Layers model (HUT-nlayers), Lemmetyinen et al., 2010[23] et Microwave Emission Model of Layered Snowpacks adapted to include backscattering MEMLS3&a, Proksch et al., 2015[41]. Ces principaux modèles à couches multiples sont décrits et comparés de façon très complète dans Royer et al., 2017[49]. Récemment, Picard et al., (2018) [39] ont synthétisé ces différents formalismes des propriétés électromagnétiques de la neige et du transfert radiatif dans un nouvel outil incorporant les approches précédentes : Snow Media Radiative Transfert Model (SMRT). Ces modèles permettent de simuler les radiations émises par le sol sous-jacent et interagissant avec les couches de neige successives en prenant compte des caractéristiques des couches de neige, et ce en fonction de la fréquence ( $f$ ) de la polarisation ( $p$ ) et angle d'observation  $\theta$  tel qu'illustré à la Figure 1.

## 1.2 Problématique

La précision de la modélisation de l'émission micro-onde du manteau neigeux est limitée d'une part par la paramétrisation de la microstructure de la neige (grain de neige, leur agencement dans l'espace, etc.) et d'autre par la procédure employée pour mesurer la microstructure de la neige sur le terrain. La méthode de mesure la plus exacte, la tomographie à rayons X (Löwe and Picard, 2015[25]), s'avère impossible à réaliser en milieu éloigné, ce qui nous incite à employer des méthodes alternatives de mesure de la microstructure. La validation de méthodes de mesure avec des instruments plus adaptés au terrain, rapides et précis est nécessaire pour réaliser des campagnes d'observations de la neige in-situ et les comparer aux modèles du manteau neigeux. D'autre part, le problème qui limite la précision de la modélisation micro-onde résulte de la stratification très contrastée du manteau neigeux, en termes de densité et de texture de la neige. Par exemple, un couvert nival subarctique « typique » sera constitué de neige fraîche peu dense en surface, de petits grains à densité moyenne à compacte au fur et à mesure que la profondeur augmente, et avec des gros grains peu denses, appelé « givre de profondeur » dans au bas de la colonne de couvert nival (voir la

revue synthèse de Dominé et al., 2008[15]).

Pour augmenter la précision du lien entre la microstructure et les micro-ondes, il est nécessaire d'établir d'une part de nouvelles méthodes de mesurer la microstructure de la neige et d'autre part d'établir un protocole permettant la comparaison des coefficients de transfert radiatif pour chaque couche de neige homogène extraite du manteau neigeux. Dans le premier cas, nous présentons ici une nouvelle méthode d'analyse de la microstructure avec un micro-pénétrömètre (SMP : Snow Micro-Penetrometer) développé au Centre d'avalanche de Davos (SLF, Schneebeli et al., [52]). Cette approche originale n'a jamais été réalisée avec la modélisation DMRT-ML. Dans le deuxième cas, pour éliminer les sources de variabilité causées par l'empilement des strates de neiges hétérogènes et l'effet du sol sous-jacent, nous avons isolé des couches homogènes du manteaux neigeux dans un échantillonneur. Cette approche a été suggérée avec succès par Weisman et al., (1998) mais sans mesures précises de la microstructure de la neige. À l'époque, la microstructure de la neige était mesurée par analyse visuelle de l'étendue maximum des grains posés sur une plaque (1-D), donc très imprécise et fortement dépendant de l'opérateur. La méthode des couches isolées a été reprise par Touré et al. avec une approche un peu meilleure pour la définition de la taille des grains (par photo infra-rouge), mais encore avec une grande incertitude (Montpetit et al., 2012). Récemment, Maslanka et al., (2016) [26] et Sandells et al., (2017) [51] ont repris l'expérience en Finlande avec un jeu de données de microstructure par tomographie à rayons-X, mais sans analyse approfondie du transfert radiatif. Cette expérience n'a ainsi jamais été complétée avec des mesures quantitative de la microstructure de la neige (e.g. surface spécifique de la neige), et avec un modèle semi-empirique de transfert radiatif (e.g. DMRT-ML). La validation et la paramétrisation du modèle de transfert radiatif permettra de mieux interpréter les mesures radiométriques pour comprendre l'évolution du manteau neigeux et développer des algorithmes qui permettent de quantifier les paramètres du manteau neigeux à partir d'observations satellitaires.

### 1.3 Objectifs et hypothèses

Les expériences effectuées dans le cadre de cette maîtrise ont pour but d'améliorer la caractérisation de la microstructure neigeuse subarctique et d'étudier l'impact de celle-ci sur le transfert radiatif dans les micro-ondes passives. En particulier, il s'agit d'évaluer avec une approche statistique la validité de nouvelles procédures de mesures de microstructure à l'aide des modèles de transfert radiatifs existants (DMRT-ML et SMRT, MEMLS) dans le but de faciliter éventuellement la réalisation d'expériences sur le terrain. Ce travail comprend deux objectifs spécifiques, traités en deux parties distinctes.

1. Caractériser les données SMP comme intrants dans DMRT-ML (Expérience SMP-DMRT);

2. Caractériser la microstructure de la neige sur le transfert radiatif micro-onde passif à l'aide de mesures radiométriques de la neige par couche isolée du manteau (Expérience couche).

### 1.3.1 Expérience SMP-DMRT

Le premier objectif spécifique adressé dans ce mémoire vise à montrer qu'il est possible d'extraire, des mesures du SMP, l'information microstructurale susceptible d'améliorer la modélisation de l'émission micro-onde d'un manteau neigeux avec le modèle physique DMRT-ML. Ce modèle en particulier a été choisi pour nos analyses dans le but d'apporter une réponse à une question soulevée par les travaux précédents de nos collaborateurs, en particulier la question de l'existence d'un paramètre d'échelle  $\phi$  dans DMRT nommé par Brucker et al.,[6], étudié par Roy et al., 2013[47] et dont le lien avec le paramètre de cohésion  $\tau$  est défini par Lowe et Picard.,[25] et paramétrisé dans DMRT-ML. Une hypothèse a été proposée, suggérant que ce paramètre de cohésion des grains  $\tau$ , qu'il est possible d'évaluer de façon exacte par tomographie et représentant la tendance qu'ont les grains à s'agglomérer, pourrait être corrélé à une mesure de la résistance mécanique des différents types de neige avec un micro-pénétrromètre équipé d'une pointe piézoélectrique. Le modèle DMRT-ML a donc été choisi dans cette section pour pouvoir étudier le lien avec le paramètre  $\tau$ . Les résultats du modèle obtenus avec les paramètres du SMP pour la densité ( $\rho_{SMP}$ ) et la surface spécifique ( $SSA_{SMP}$ ) seront comparés aux résultats obtenus par les mesures plus traditionnelles de densité de la neige ( $\rho_{neige}$ ) et de la surface spécifique (Specific Surface Area :  $SSA_{IRIS}$ ) pour caractériser les grains de neige. La précision de la modélisation est évaluée par une analyse de l'erreur moyenne quadratique (RMSE : Root Mean Square Error) entre les mesures réalisées avec nos radiomètres micro-ondes terrain (Surface Based Radiometer : SBR) et les simulations de  $T_B$  par les modèles de transfert radiatif avec comme intrant d'une part l'utilisation de la procédure conventionnelle basées sur la mesure de la SSA et densité de la neige et d'autre part l'utilisation du SMP. Cette hypothèse est éclairée par l'intuition qu'une mesure mécanique de la texture de la neige peut nous informer de la texture et la tendance qu'elle a à s'agglomérer. Il est intéressant de relier l'origine de cette intuition avec les connaissances traditionnelles inuites, chez qui le son produit par le piétinement de la neige fait partie des critères qui différencient les types de texture de neige.

Il est à noter que la réalisation d'une mesure SMP présente plusieurs avantages par rapport à la réalisation d'une mesure traditionnelle du profil de densité et de taille de grain de neige dans un puits de neige (appelé snowpit dans la suite du document). D'une part, la résolution du profil vertical qu'il est possible de mesurer par le SMP est beaucoup plus élevée que celle des mesures qui se limite habituellement à un échantillonnage sur une échelle de 3 à 5 cm et nous permet de détecter des structures plus fines. D'autre

part, le temps nécessaire pour la mesure d'un profil complet est beaucoup plus court, ce qui implique qu'il est possible de réaliser un plus grand nombre de profils et d'obtenir des informations sur la variabilité spatiale des couches à différentes échelles spatiales. Cette variabilité spatiale constitue un problème des mesures radiométriques qui a été soulevé par Rutter et al., (2014) [50].

### **1.3.2 Expériences de caractérisation des couches homogènes**

Le second objectif spécifique de ce mémoire vise l'analyse de l'utilisation de la longueur de corrélation exponentielle comme paramètre structurel de la neige, ainsi que l'analyse des coefficients d'absorption et de diffusion de la neige par des mesures réalisées par couches de neige homogènes extraites du manteau neigeux. L'inversion des valeurs des coefficients d'absorption et de diffusion micro-onde modélisés est possible par l'utilisation d'un montage expérimental qui permet les mesures du rayonnement micro-onde d'une couche homogène de neige déposée successivement sur un substrat réfléchissant et absorbant (sur un corps noir). L'hypothèse formulée est que le système d'équations obtenues avec ce protocole expérimental permet d'inverser avec suffisamment de précision les coefficients d'absorption, de diffusion et la longueur de corrélation de chacune des couches analysées. La précision des résultats est analysée par rapport aux données de la littérature et à la théorie de Rayleigh. La longueur de corrélation inversée est comparée à la métrique approchée de la microstructure de la neige communément utilisée, définie par la relation de Debye (1948) (voir Mätzler et al., 2002[30]).

## **1.4 Plan de thèse**

Après un bref rappel théorique (Section 2), les deux expériences réalisées seront présentées avec leurs résultats respectivement dans les Sections 3 (Expérience SMP-DMRT) et 4 (Expérience couche). Comme ce sont des expériences indépendantes, il a été choisi de présenter les données, la méthodologie, les résultats et la discussion de chacune de ces expériences dans leur section respective. Une conclusion générale est présentée à la Section 5 et les annexes rassemblent des informations complémentaires à ces chapitres. Un complément sur l'instrumentation vient ajouter des détails spécifiques à l'utilisation et la calibration des instruments utilisés dans le cadre de ces expériences.

## 2 Contexte théorique

### 2.1 La physique de l'interaction des micro-ondes dans un manteau neigeux

Seulement quelques éléments d'information sur le sujet sont ici présentés, étant donné les nombreux ouvrages très complets portant sur la physique de la mesure dans le domaine des micro-ondes. Nous invitons le lecteur à se référer par exemple aux livres de Rees et al., (2012)[45] (en anglais) ou Becker et al., (2011) [3] (en français).

La surface terrestre émet naturellement des radiations micro-ondes qui suivent approximativement la loi d'émission thermique du corps noir modulée par l'émissivité de la surface. Le rayonnement émis vers le ciel aux fréquences dans les bandes micro-onde est nommé la température de brillance ( $T_B$ ), et pour une fréquence donnée, il est lié à l'émissivité  $e$  et à la température  $T$  par la relation  $T_B = e \cdot T$ . Ce rayonnement naturel de la surface est diffracté en raison de constante diélectrique effective de la neige, mais aussi absorbé, diffusé et réfléchi par les irrégularités que constituent les grains de neige et les interfaces du manteau neigeux, dans des proportions qui dépendent fortement de la fréquence et de la polarisation dans les bandes micro-ondes. L'équivalent en eau de la neige (EEN) peut être estimé à l'aide d'un algorithme basé sur la comparaison des  $T_B$ . Pour ce faire, une comparaison multifréquentielles est effectuée, comparant le rayonnement mesuré à une fréquence où la diffusion par les grains de neige est dominante ( $> 25$  GHz, 37 GHz est souvent utilisé) à une fréquence où la diffusion n'est pas dominante ( $< 25$  GHz, 19 GHz est souvent utilisé) (Chang and Foster, 1982[8]).

La modélisation de l'interaction des micro-ondes avec la neige est un problème difficile à résoudre car les grains de neige agissent comme des centres diffuseurs pour les radiations micro-ondes, surtout pour les fréquences supérieures à 30GHz ( $\lambda < 10$  mm) parce que la taille des irrégularités des grains de neige des échantillons granuleux devient du même ordre de grandeur que la longueur d'onde. Dans ce domaine des fréquences plus élevées, les tailles des diffuseurs nous placent à une transition entre les régimes de diffusion de Rayleigh et de Mie ( $\frac{\lambda}{10} = 1.5$  mm  $\approx \Delta x$ ). D'autre part, la densité élevée (de l'ordre de 30% de volume) de la neige situent ces interactions dans un régime où ces théories sont inadéquates puisqu'il n'est plus possible d'ignorer les interactions entre les paires de diffuseurs (voir Löwe et Picard [25], ou encore Tsang et al., 2000[57]). De plus, dans un échantillon naturel, les tailles des grains de neige ne sont pas homogènes, mais présentent plutôt des dimensions réparties selon une distribution de taille, qui peut être représentée pour les mesures optiques par une taille effective plus grande que la moyenne des tailles des grains (Tsang et al., 2013 [58]). Ainsi, la taille des grains, la longueur d'onde des radiations, la densité, mais

aussi la distribution spatiale des diffuseurs et leur distribution de taille sont des paramètres micro-structuraux qui déterminent les coefficients d'absorption et de diffusion volumiques des couches homogènes de neige. La température de la neige affecte le signal par une modification de la constante diélectrique en température (voir Matzler et al., 1987 [28]) ainsi que par une variation de l'émissivité de la glace en température. Lorsque la température se rapproche du point de fusion, la présence d'un contenu en eau liquide (LWC) affecte beaucoup le signal en absorbant les ondes et en augmentant grandement l'émissivité de la neige (voir Picard et al., 2013[38]). Cependant, dans la présente recherche, les conditions sont toujours à des températures inférieures au point de congélation et donc en condition de neige sèche (LWC=0). D'autre part, l'épaisseur de neige, les changements abrupts dans le profil vertical de densité comme la présence de croûtes de glace forment des interfaces où un changement abrupt de constante diélectrique occasionnent des effets de réflexion polarisée (voir Montpetit et al., 2013[36]), surtout pour les angles d'incidence près de l'angle de Brewster auprès duquel les capteurs satellitaires opèrent ( $\approx 55^\circ$  par rapport au nadir). Finalement des couches ainsi que la rugosité des interfaces inférieurs, supérieurs et ceux entre les couches affectent la diffusion totale ainsi que les réflexions ou les effets de cohérence que subissent les radiations micro-ondes qui traversent le manteau neigeux (Voir Chang et al., 2012[11]).

## 2.2 La modélisation du transfert radiatif

Les modèles actuels de transfert radiatif à travers des couches multiples de neige DMRT-ML, DMRT-QMS, HUT-nlayers et MEMLS3&a ont été comparés dans l'article de revue de Royer et al., 2017[49]. Le récent modèle SMRT réunit dans un même module plusieurs de ces modèles. Le modèle semi-empirique de transfert radiatif des micro-ondes dans la neige DMRT-ML (Picard et al., 2013[38]) est utilisé pour simuler la  $T_B$  d'une surface enneigée, en modélisant les coefficients d'absorption, de diffusion et de réflexion, ainsi que la phase des radiations micro-ondes à partir d'une description de l'état d'un manteau neigeux. Ce modèle utilise l'approche DMRT (Dense Media Radiative Transfer)(Tsang et al., 1985[59]; Shih et al., 1997[54]) pour calculer à partir de principes électromagnétiques les coefficients d'absorption et de diffusion d'un milieu continu constitué de sphères dures agglomérées (sticky hard spheres, SHS). Le milieu à l'intérieur d'une couche de neige tel qu'il est défini par cette méthode correspond donc à une distribution spatiale de sphères de glace caractérisée par une densité moyenne ( $\rho$ ), un rayon optique ( $R_{opt}$ ) ainsi qu'un paramètre de cohésion ( $\tau$  : *stickiness*). Les valeurs précises de ces paramètres peuvent s'évaluer de manière très précise à l'aide d'instruments de mesures comme le tomographe à rayons X, mais malheureusement cette méthode n'est pas réalisable sur le terrain. Pour effectuer nos analyses avec DMRT-ML, la méthode employée le

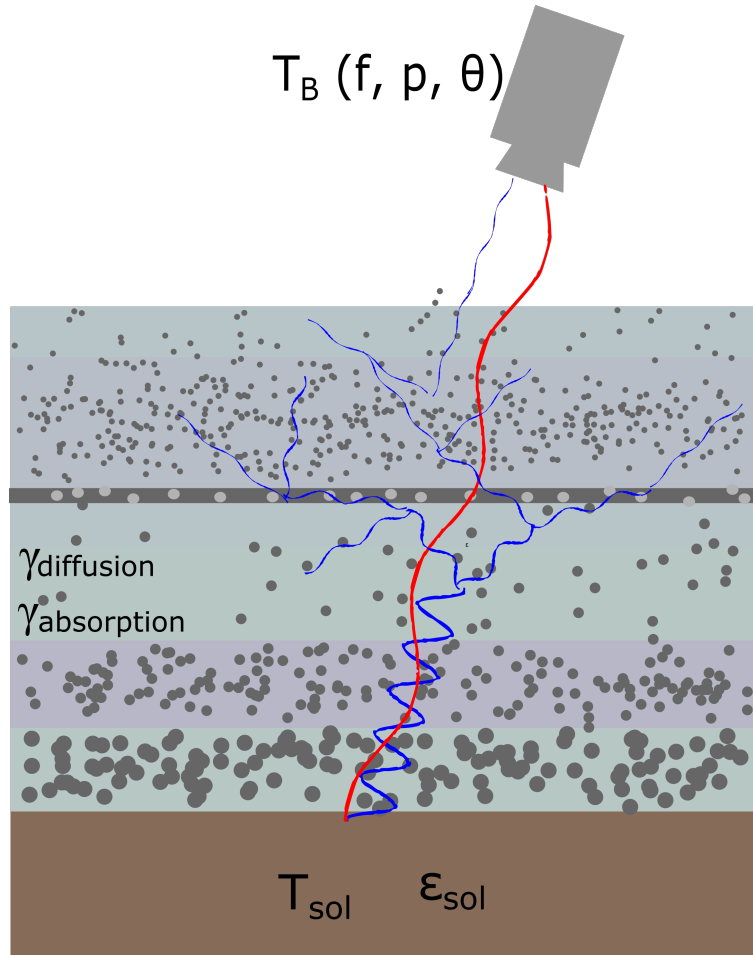


Figure 1 – Schéma représentant le transfert radiatif à travers les couches d'un manteau neigeux. Le rayonnement micro-onde émis par la surface du sol suivant la loi de rayonnement du corps noir pondéré par l'émissivité de la surface. Les radiations de différentes fréquence interagissent avec les grains de neige et les strates du manteau neigeux. Un modèle de transfert radiatif détermine le coefficient de diffusion et d'absorption en intégrant l'effet de chaque couche pour déterminer la température de brillance en fréquence ( $f$ ), polarisation ( $p$ ) et angle ( $\theta$ ) observée par les radiomètres orientés vers le sol.

plus souvent consiste en l'utilisation d'un rayon optique équivalent ( $R_{opt}$ ) dérivé de la surface spécifique de la neige, et de remplacer le paramètre de cohésion par un coefficient  $\Phi$  qui multiplie le  $R_{opt}$  (voir Roy et al., 2013[47]). Des estimations de ces quantités sont donc obtenues indirectement sur le terrain à partir de quantités mesurables comme la densité, la surface spécifique de la neige (Mätzler, 2002[30]) ou le profil de micro-pénétrométrie (Löwe and van Herwijnen, 2012[24]).

Après avoir déterminé précisément les coefficients de diffusion et d'absorption, le modèle utilise la méthode de transfert radiatif des ordonnées discrètes (DISORT) pour résoudre numériquement l'équation de transfert radiatif des micro-ondes à travers un empilement de couches disposés selon des plans parallèles. Une autre approche pour calculer les coefficients de transfert radiatif de la neige est l'Improved Born Ap-



proximation (IBA) (voir Mätzler et al., 1998 [29]). Ce modèle modifie les propriétés de l'approximation de Born standard (qui est utilisée dans la théorie de la diffusion) en reproduisant la diffusion de Rayleigh pour les particules seules, et pour les milieux denses, le coefficient de diffusion adopte un comportement non-linéaire avec une augmentation de la densité, un effet qui est comparable à celui observé dans la théorie DMRT. Cette approche IBA est incorporée dans MEMLS. Le calcul de la permittivité de la neige qui est utilisée pour calculer la diffusion, la réfraction, la réflexion et l'absorption est une relation empirique basée sur des équations et des approximations physiques. C'est parce qu'ils incorporent à la fois un calcul physique et empirique que nous appelons ces modèles semi-empiriques.

### 2.3 Paramètres de microstructure de la neige

La longueur de corrélation exponentielle  $L_{exp}$  est une quantité importante qui est définie à partir de la pente à l'origine de la fonction d'autocorrélation de la phase de glace du milieu neigeux. Cette relation est mesurée directement à partir de tomographie à rayons X, et elle sert de paramètre d'entrée à plusieurs modèles de transfert radiatif dont MEMLS. Ce paramètre est utilisée dans le modèle IBA. Cependant, cette quantité ne se mesure pas facilement directement sur le terrain. Cette quantité est liée à la SSA et à  $\rho$  (voir Mätzler et al., 2002 [30]) par la relation :

$$L_{exp} = 4 * (1 - \nu) \frac{1}{\rho_{ice} * SSA} = 4 * (1 - \nu) \frac{R_{opt}}{3} \quad (1)$$

Où  $\nu = \rho / \rho_{ice}$ , et  $\rho_{ice}$  est la densité de la glace. Pour un EEN constant, le paramètre affectant le plus la  $T_B$  de la neige à 37 GHz est  $R_{opt}$  (Brucker et al., 2010[7]). Une grande partie de l'erreur de modélisation ( $\Delta T_B$  entre 16 et 29 K à 37 GHz) (Tan et al., 2015[55]) est attribuable à une mesure inadéquate de la taille des grains de neige. Il apparait en effet que la microstructure définie uniquement par la SSA et la densité de la neige ne permet pas d'obtenir des précisions satisfaisante quelque soit le modèle utilisé (Royer et al., 2017 [49]). Des études telles que celles de Brucker et al., (2010)[6], Roy et al., (2013)[47] et Lowe et al., (2015)[25] suggèrent que des gains de précision significatifs sont attendus avec une amélioration de la représentation de la microstructure dans les modèles de transfert radiatif de la neige.

Le paramètre  $R_{opt}$  peut être calculé à partir de la SSA qui est mesurée à l'aide de l'instrument IRIS (Shortwave InfraRed Integrating Sphere : Montpetit et al., (2012) [34]). Cet instrument fonctionne à partir d'une mesure du coefficient de réflexion de la neige à 1310 nm, qui est ensuite directement liée à la surface spécifique ( $SSA_{IRIS}$ ) de la neige. Le  $R_{opt}$  mesuré par IRIS ( $R_{IRIS}$ ) est ensuite déduit de la  $SSA_{IRIS}$

par l'équation  $R_{opt} = \frac{3}{\rho_{ice} * SSA}$ , qui permet de modéliser adéquatement un paramètre de taille objectif avec une grande précision et une excellente reproductibilité (Montpetit et al., 2012 [34]). Le paramètre  $\rho_{neige}$  se mesure bien de façon traditionnelle en évaluant la masse d'un volume de neige connu, prélevé avec un couteau à densité. Le paramètre de cohésion  $\tau$ , quant à lui, n'est pas facilement mesurable sur le terrain, ce qui est problématique étant donné le rôle important qu'il joue dans la modélisation de la neige par l'approche DMRT. Les  $T_B$  simulées avec le modèle DMRT-ML pour les neiges subarctiques montrent en effet des écarts importants par rapport aux mesures si on ne prend pas en compte ces effets de cohésion (Roy et al., 2013[47]).

L'étude de Picard et Lowe, (2015)[25] démontre également la nécessité de prendre compte du paramètre de cohésion  $\tau$  pour décrire la neige dans le modèle DMRT-ML. En approximant l'agglomération des sphères par un facteur  $\Phi$  multipliant leur rayon optique, il est possible de minimiser l'erreur de simulation des  $T_B$  par rapport aux mesures radiométriques. Par cette approche, différentes valeurs de ce facteur  $\Phi$  ont été optimisées : 2.3 puis 2.7 pour la neige de l'Antarctique (Picard et al., 2014[5] , et Brucker et al., 2011[6]), 3.5 pour la calotte glaciaire de Barnes (Dupont et al., 2014[16]), et 3.3 pour la neige saisonnière subarctique (Roy et al., 2013[47]). Il apparaît ainsi que ce facteur correctif sur la taille moyenne des grains dépend du type de neige qui est différent selon les conditions climatiques en Antarctique, dans les Alpes ou la taïga subarctique canadienne. Ainsi, la paramétrisation de la microstructure, si elle n'est pas adéquatement prise en compte, nécessite une calibration pour chaque milieu d'étude. L'approche par la longueur de corrélation exponentielle nécessite aussi une fonction de calibration pour compenser l'erreur générée par la microstructure (Montpetit et al., 2013[36] ; Krol et Löwe, 2016[21] ).

## 3 Expérience SMP-DMRT

### 3.1 Méthode

#### 3.1.1 Sites d'étude et données

Les données utilisées pour cette étude proviennent de campagnes de mesures réalisées au cours de 3 années (de 2015 à 2017). Les sites de mesures sont répartis sur un gradient latitudinal (voir carte à la figure 2) ce qui permet de représenter une diversité de conditions neigeuses des régions de climat subarctique. Les campagnes de mesures regroupant l'ensemble des mesures requises (SBR, Densité, Température, IRIS, SMP) sont regroupées au tableau 1. Des sites de neige en milieu ouvert, non perturbés, et sans couvert forestier dans le champ de visée ont été sélectionnés. Les propriétés de la neige mesurée à ces sites de mesures se retrouvent en annexe dans les tableaux 10, 11 et 12. Ces données sont aussi décrites dans deux articles conjoints : Royer et al., 2017 [49] et Larue et al., 2018[22]. Les sols étaient parfois gelés et parfois non-gelés, et les propriétés radiatives du sol utilisées dans le modèle sont les constantes adaptées pour le sol du nord du Québec décrites dans l'article (Montpetit et al., 2018 [35]).

Tableau 1 – Sites d'études rassemblant les mesures nécessaires pour l'objectif 1.

Sites	Nom	Nombre de mesures	Date début	Date fin	Coordonnées	
Baie James	BJ_jan2015	8	10-janv-15	13-janv-15	53.70 N	76.05 W
Baie James	BJ_fev2015	12	16-feb-2015	23-feb-2015	53.70 N	76.05 W
SIRENE	SIRENE	3	26-janv-15	05-févr-15	45.37 N	71.92 W
Forêt Montmorency	MOREX1	1	12-janv-16	14-janv-16	47.32 N	71.15 W
Forêt Montmorency	MOREX3	2	07-mars-16	08-mars-16	47.32 N	71.15 W
Forêt Montmorency	MOREX2017	2	18-janv-17	19-janv-17	47.32 N	71.15 W
Umiujaq	UMI2017	4	25-mars-17	25-mars-17	56.55 N	76.46 W

Les données mesurées dans les fosses à neige (snowpit) sont : les profils verticaux de densité de la neige, la température et la SSA de la neige, à tous les 5 cm, la température du sol à l'interface sol/neige, l'identification de la hauteur et l'épaisseur des croûtes de glace, le type de grain de neige pour chaque couche apparente avec une inspection visuelle de leur taille et morphologie. La densité de la neige ( $\rho_{couche}$ ) a été mesurée à tous les 5 cm à l'aide d'un couteau à densité et d'une balance. La température de chaque couche a également été relevée à tous les 5 cm. La taille des grains a été mesurée par réflectométrie infrarouge par l'appareil IRIS (Montpetit et al., 2012[34]). Pour chaque site, au moins cinq profils verticaux de force de rupture des grains de neige ont été réalisés avec l'appareil SMP. Ces profils ont été mis en concordance entre eux et prétraités (calculs de la densité de la neige et SSA, voir ci-dessous pour les données SMP), puis ont



Figure 2 – Carte des sites de mesures, répartis sur un gradient latitudinal qui couvre les principaux domaines bioclimatiques canadiennes : Umiujaq (Toundra), Baie James (Taïga), Montmorency (Forêt boréale) et Sherbrooke (Forêt mixte)

été utilisés pour paramétrer les entrées du modèle DMRT-ML. Nous avons utilisé successivement plusieurs combinaisons de traitements des paramètres du SMP et nous avons effectué à chaque fois une optimisation des simulations des  $T_B$  par rapport aux mesures radiométriques. Un exemple de mesures stratigraphiques des températures, de la densité ( $\rho_{couteau}$ ) et de la surface spécifique ( $SSA_{IRIS}$ ) comparé aux paramètres calculés à partir des mesures SMP ( $\rho_{SMP}$  et  $SSA_{SMP}$ ) est présenté à la Figure 3. Cette figure illustre bien le gain significatif en résolution verticale d'échantillonnage apporté par le SMP.

### 3.1.2 Description des mesures radiométriques

La mesure de l'émission micro-ondes du sol est effectuée avec les radiomètres terrain (PR-series, Radiometrics, Boulder, CO), qui opèrent aux fréquences de 10.67, 19.0, 37.0 et 89.0 GHz (notées 10, 19, 37 et 89 GHz) en polarisation H et V. Ces radiomètres sont orientés avec un angle d'incidence de  $55^\circ$  par rapport au nadir, un angle proche de l'angle de Brewster, qui est employé en télédétection micro-ondes passives[12]. La procédure de calibration des radiomètres est exposée dans le complément d'instrumentation à la Section 7.1. Il est également important de mentionner que les propriétés radiométriques des sols sub-arctiques qui

sont sous-jacents au manteau neigeux utilisent les valeurs de rugosité et d'émissivité tirées de l'étude de Montpetit et al., 2018[35].

### 3.1.3 Données et traitement SMP

Le micro-pénétrromètre (Snow Micro-Penetrometer : SMP, Schneebeli 1999 [53]) est un instrument permettant d'obtenir des informations micro-structurales par pénétrométrie, c'est à dire par la mesure des forces de ruptures des grains de neige à l'aide d'une pointe équipée d'un capteur piézoélectrique. Cette mesure est effectuée sur une échelle beaucoup plus fine que les échantillonnages traditionnels, ce qui nous amène à envisager l'utilisation de ces mesures de la microstructure pour obtenir de nouvelles informations sur la texture de la neige. Plus de détails techniques sur le fonctionnement du SMP sont indiqués dans le complément sur l'instrumentation à la Section 7.2.

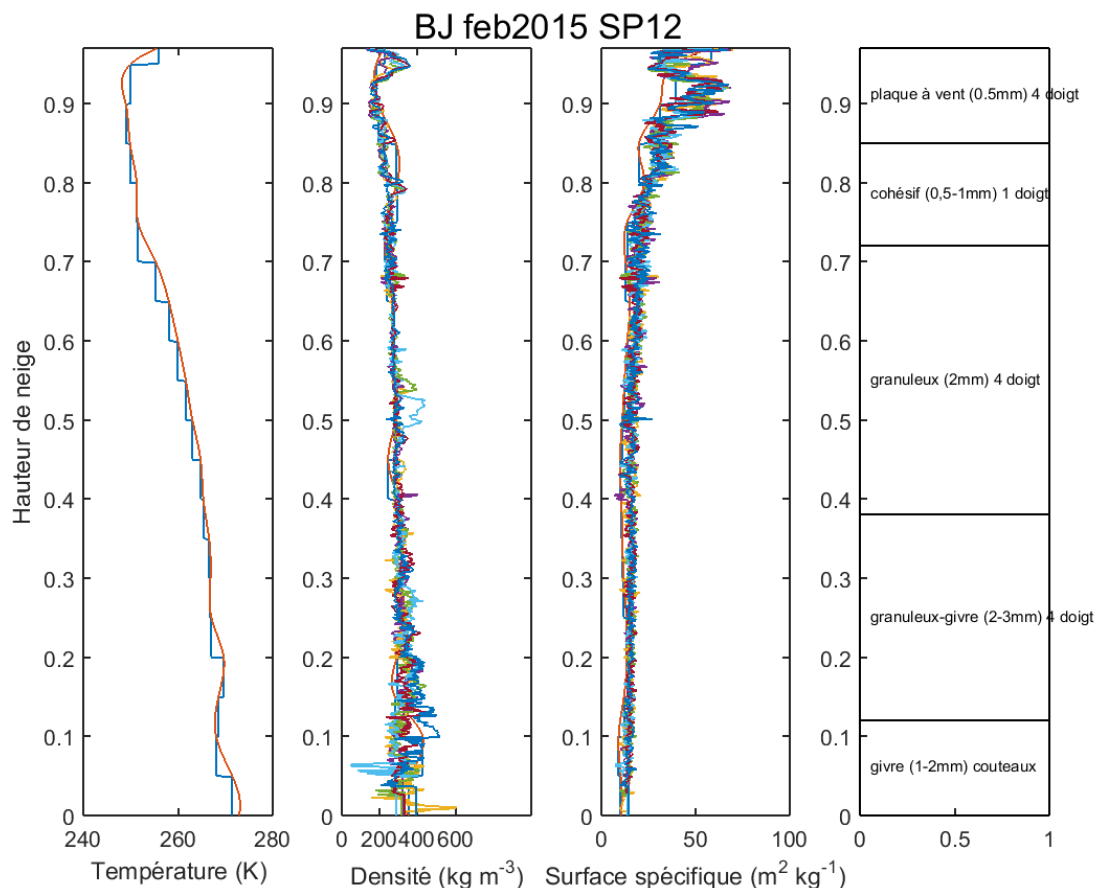


Figure 3 – Profil des couches de neige réalisé à la Baie James en Février 2015. On y retrouve le profil vertical de température, de densité, de surface spécifique, puis la stratigraphie visuelle et les types de grains de neige identifiés. Pour la densité et la SSA, les traits bleus correspondent aux données SMP.

### 3.1.3.1 Sélection des profils

Le calcul des paramètres microstructuraux à partir du signal brut mesuré par le SMP implique un procédé de sélection, de tri, de lissage et de calcul par des modèles empiriques. En effet, des irrégularités peuvent s'introduire dans les profils à cause d'erreurs de manipulation ou d'obstacles dans le manteau neigeux nécessitant un examen attentif des mesures brutes pour obtenir des résultats représentatifs des paramètres structuraux. Ce processus de tri préliminaire illustré à la figure 4 a donc éliminé 15 profils SMP sur les 113 qui étaient disponibles, ce qui nous laisse 98 profils pour l'analyse. Plus de détails sur la procédure de classifications sont disponible dans le complément d'instrumentation en fin de document, à l'annexe 7.2.2. Il serait important d'étudier plus en détail les profils différents pour mettre en évidence la variabilité spatiale du profil stratigraphique qui pourraient expliquer des variations de l'émission micro-onde sur une échelle inférieure au mètre. Nous recommandons donc à ce sujet la réalisation d'études de la variabilité spatiale des profils SMP corrélés avec les mesures radiométriques.

### 3.1.3.2 Calculs de la microstructure à partir des mesures SMP

À partir des paramètres  $L$  et  $F$  dérivés d'un modèle de structure à partir du signal enregistrés par l'appareil (voir Proksch 2015 [42]), un modèle statistique a été établi à partir d'une régression linéaire de manière à récupérer les propriétés microstructurales de la neige,  $\rho_{SMP}$  et  $R_{SMP}$ . Le calcul des paramètres est détaillé à la section 7.2 des détails sur l'instrumentation.

Un seuillage est appliqué aux valeurs mesurées pour imposer des limites physiques aux densités et rayons optiques. Ainsi, la densité  $\rho_{SMP}$  est limitée par une borne supérieure de  $917 \text{ kg m}^{-3}$  (la densité de la glace pure  $\rho_{ice}$ ) et une borne inférieure de  $20 \text{ kg} \cdot \text{m}^{-3}$ , et la surface spécifique  $SSA_{SMP}$  est limitée à une borne supérieure de 125 et à une borne inférieure de  $2 \text{ m}^2 \cdot \text{kg}^{-1}$  (limite de précision de l'appareil).

### 3.1.4 Organigramme méthodologique

La Figure 5 présente un schéma de la méthodologie utilisée pour l'analyse de l'utilisation du SMP dans les simulations des  $T_B$  avec le modèle DMRT-ML.

Les données du SMP ont été lissées à différentes échelles, d'abord sur des fenêtres 5 cm, équivalentes à l'échelle mesures des mesures de IRIS et du couteau à densité, puis sur une échelle de 1 cm. Lorsque les fenêtres de 1 cm ont été utilisées, c'est les valeurs de  $R_{IRIS}$  de  $\rho_{couteau}$  qui ont été sous-échantillonnées sur des fenêtres de 1 cm à partir des profils lissés qu'on voit en rouge sur la Figure 3. Conformément aux

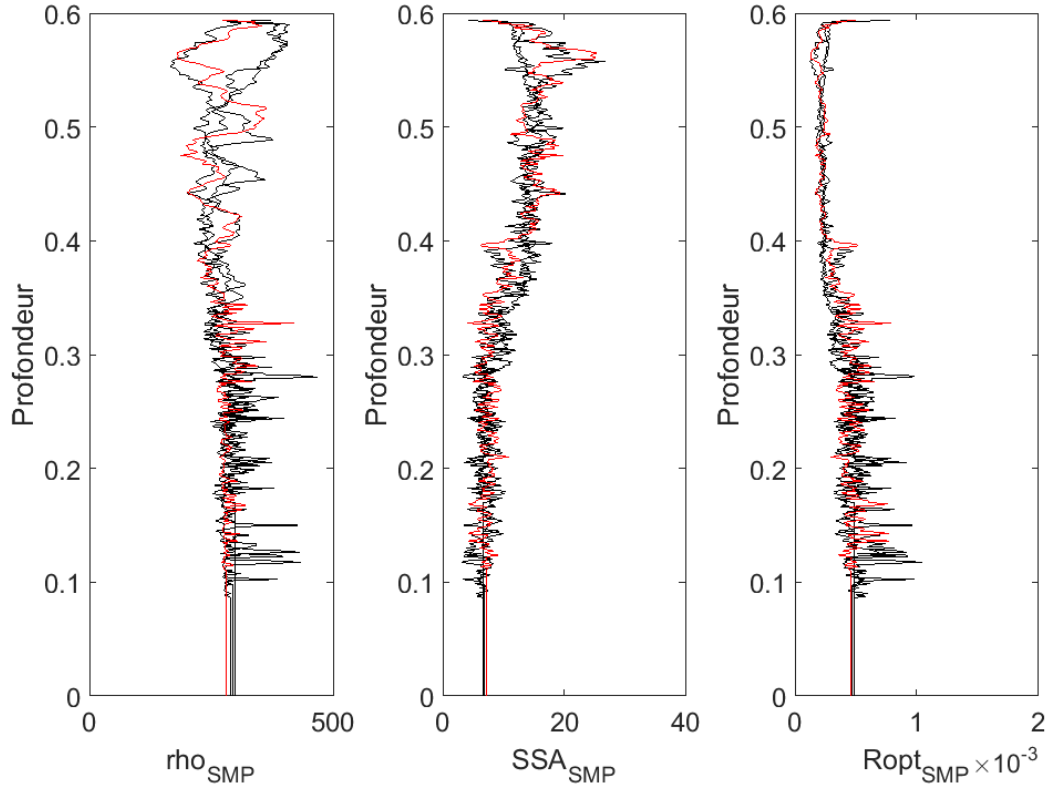


Figure 4 – Exemple de mesure étudiée lors du tri visuel des profils SMP. Un algorithme de lissage utilisant une fenêtre de convolution identifie sur la couche en rouge la présence d'irrégularités qui dévient la valeur de façon significative par rapport aux autres profils SMP de densité et de  $R_{opt}$  (en noir). Lorsqu'une déviation majeure est relevée, la couche est éliminée. Ces déviations sont considérées dans cette analyse comme des artefacts de mesure qui peuvent être provoqués par des croutes de glaces irrégulières ou la présence de branches dans le profil neigeux. Après ce tri, un total de 98 profils SMP a été retenu. Il est à noter que ces irrégularités dans les profils éliminés peuvent être utilisées pour étudier la variabilité spatiale des profils SMP.

analyses précédentes qui ont montré la nécessité d'ajouter un facteur multiplicatif aux données de tailles de grains pour minimiser l'erreur entre les  $T_B$  mesurées et simulées (voir la section théorique et ci-dessous la Section 3.5), nous avons déterminé pour chaque combinaison de paramètres la valeur optimale d'un facteur d'échelle, noté  $\Phi_0$ , qui minimise la valeur du RMSE 37V. Il y a en effet un couplage entre SSA et densité, qui nécessite de refaire une optimisation dans chaque configuration analysée. Ce facteur multiplicatif permet aussi de compenser indirectement du point de vue micro-onde, les régressions d'inversion du SMP. Les différents cas de figure pour définir la microstructure ont été comparés, en utilisant chaque combinaison des données mesurées in-situ : la SSA ( $SSA_{SMP}$  ou  $SSA_{IRIS}$ ) et la densité de la neige ( $\rho_{SMP}$  ou  $\rho_{couteau}$ ).

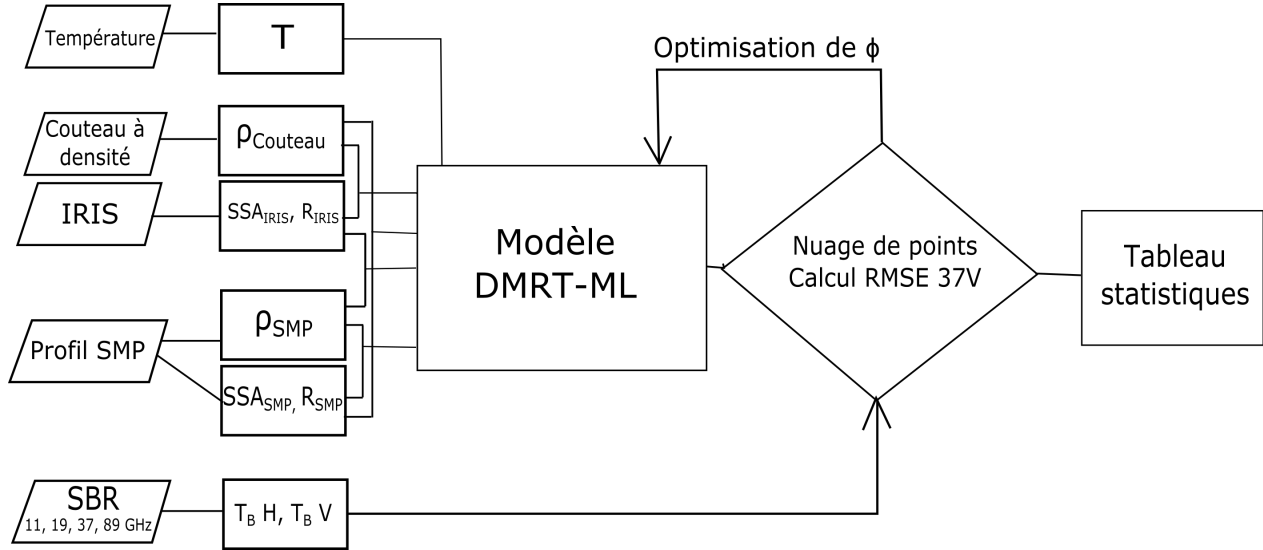


Figure 5 – Organigramme méthodologique. À gauche, on retrouve les instruments utilisés pour faire les mesures et les paramètres mesurés. Ces données servent d’entrée au modèle DMRT-ML. Les  $T_B$  simulés résultant de la modélisation sont ensuite comparés aux  $T_B$  mesurés par les SBR par la réalisation d’un nuage de points et le calcul du  $RMSE_{37V}$ . Une optimisation d’un facteur d’échelle (noté  $\Phi$ ) qui multiplie les valeurs du rayon optique est réalisée par la minimisation du RMSE 37V.

### 3.1.5 Facteur de minimisation de l’erreur de simulation

Il a été montré que, dans la théorie DMRT, l’ajout d’un facteur multipliant le rayon optique  $R_{opt}$  dérivé de la  $SSA$  est nécessaire pour minimiser la  $RMSE$  entre les  $T_B$  modélisés et ceux observés par les SBR (Roy et al., 2013[47], Brucker et al., 2011[6], Dupont et al., 2014[16]). La valeur de ce paramètre est estimée dans notre protocole en trouvant la valeur de  $\Phi$  qui minimise la  $RMSE$  en polarisation 37V entre les simulations de DMRT-ML et les observations radiométriques. En effet, la fréquence de 37 GHz est la plus sensible à la diffusion des micro-ondes par les grains de neige, et la polarisation verticale en particulier minimise les effets de réflexion des ondes aux interfaces entre les couches de différente densité et la contribution du sol ; ainsi, l’inversion du paramètre  $\Phi$  qui minimise l’erreur à 37V est considérée comme celui qui permet le mieux de représenter la neige. Nous avons d’abord commencé par déterminer ce facteur de correction en conservant les fenêtres d’échantillonnage sur une échelle de 5 cm. La procédure d’optimisation est réalisée par itération successives pour trouver le minimum entre la  $RMSE$  des  $T_B$  simulées et mesurées. Un exemple des courbes d’optimisation représentant la  $RMSE$  en fonction du paramètre  $\Phi$  est représenté à la Figure 6. Le facteur  $\Phi_0$  optimal correspond au minimum de la courbe de régression polynomiale d’ordre deux ajustée sur les valeurs obtenues par itération, selon la relation :



$$RMSE_{37V} = A * (\Phi - \Phi_0)^2 + RMSE_{min37V} \quad (2)$$

Il est possible de démontrer que cette équation correspondait toujours à la série des valeurs simulées des RMSE avec un  $R^2 = 1$ . De cette équation, nous obtenons les valeurs de  $\Phi_0$  qui est la valeur de  $\Phi$  pour laquelle la  $RMSE$  trouve son minimum, et la valeur de  $RMSE_{min37V}$  est cette valeur minimale. Le paramètre A de la relation (5) est associé à la courbure de la parabole, qui est liée à la vitesse de convergence de l'optimisation. Ainsi, ce paramètre, lorsqu'il est plus grand, indique que la distribution est bien centrée et que la convergence se fait rapidement. L'exemple illustré à la Figure 6 montre bien qu'il existe un minimum significatif dans l'erreur du modèle pour une valeur de  $\Phi_0$  donné.

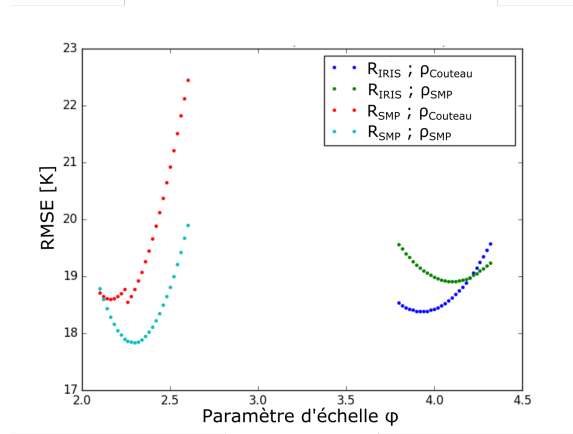


Figure 6 – Courbes d'optimisation pour le paramètre  $\Phi$  pour différentes combinaisons de données d'entrée (SMP ou mesures snowpit traditionnelles). Il est à noter que la RMSE étant une fonction quadratique, les courbes prennent une forme quadratique qui nous permettent de trouver le minimum avec une régression polynomiale d'ordre 2.

## 3.2 Résultats de l'expérience SMP-DMRT

La première analyse à effectuer consiste en la comparaison des mesures micro-structurales de densité et de taille de grain mesurées avec le SMP ( $\rho_{SMP}$  et  $R_{SMP}$ ) par rapport aux mesures réalisées par les méthodes manuelles du couteau à densité et de IRIS ( $\rho_{couteau}$  et  $R_{IRIS}$ ). Dans un second temps nous effectuerons des modélisations DMRT-ML avec chacune des paramétrisations, pour lesquelles nous procéderons à l'inversion du paramètre  $\Phi$  par la minimisation de la RMSE entre les  $T_B$  simulées et mesurées. Par cette procédure, la combinaison de paramètres permettant de minimiser la RMSE entre les modèle DMRT-ML et les mesures radiométriques sera déterminée.

### 3.2.1 Comparaison des stratigraphies manuelles et SMP pour la densité et le rayon optique

Les diagrammes de dispersion que l'on peut voir à la Figure 7 ont été réalisés de manière à comparer les valeurs calculées à l'aide du SMP aux mesures manuelles de  $\rho_{couteau}$  et de  $R_{IRIS}$  (dérivé de la SSA). Pour pouvoir les comparer, les profils SMP ont été moyennés sur une échelle de 5 cm correspondant aux fenêtres d'échantillonnage des mesures manuelles. Il est à noter que, dans ce jeu de données, plusieurs profils SMP (entre 3 et 6) ont été conservés après la procédure de tri pour chaque profil manuel. Les valeurs maximales et minimales données par les profils SMP sont indiquées par les barres verticales supérieures et inférieures sur ces graphiques, et le point central correspond à la valeur moyenne des différents profils SMP. Pour chaque graphique, une régression linéaire sur les points centraux a été calculée, dont les résultats sont présentés dans les Tableaux 2 et 3, respectivement pour  $\rho$  et le  $R_{opt}$ .

La Figure 7(a) qui représente la relation entre  $\rho_{SMP}$  et  $\rho_{couteau}$ , fait apparaître une forte variabilité. En effet, comme on peut le voir au tableau 2, une régression linéaire pour ce paramètre donne un coefficient de détermination  $R^2 = 0.52$ . De plus le SMP tend à surestimer les faibles densités et sous-estimer les fortes densités (pente de 0.69 pour l'ensemble des campagnes, avec une ordonnée à l'origine de 100.4). Malgré ce biais, les nuages de points des différentes campagnes se superposent de manière adéquate. Nous avons utilisé ces régressions pour la suite des expériences la représentation de la densité par le SMP est acceptable (régression statistiquement significative au seuil de 5%).

La Figure 7(b) représente les variations de  $R_{SMP}$  par rapport à  $R_{IRIS}$ . Il apparaît que le SMP sur-estime systématiquement les valeurs de  $R_{SMP}$  (biais positif significatif de 0.16 mm). Ce biais s'explique peut-être par un problème de calibration du modèle de régression pour estimer  $R_{SMP}$  du fait de la différence de métamorphisme de la neige du Québec par rapport aux types de neige alpins utilisé par Proksch (2015)[43]. Cette différence a été démontrée à la Eastern Snow Conference 2018 par Dr. Josh King sur des

profils de neige, et indique qu'une fonction différente devrait être trouvée, mais optimiser cette relation est en dehors du contexte du présent document. La possibilité de cette sensibilité aux conditions de métamorphisme est supportée par l'observation d'un décalage vers le haut entre les points de Janvier (en rouge) par rapport aux points récoltés en Février (en vert). Cependant, avec un facteur  $R^2 = 0.60$ , la relation globale paraît utilisable, d'autant plus que ce paramètre de taille est, par la suite, compensé par un paramètre d'échelle  $\Phi$  dans les simulations des  $T_B$ . Le tableau 3 résume les statistiques de comparaison pour  $R_{opt}$  par rapport à une régression linéaire.

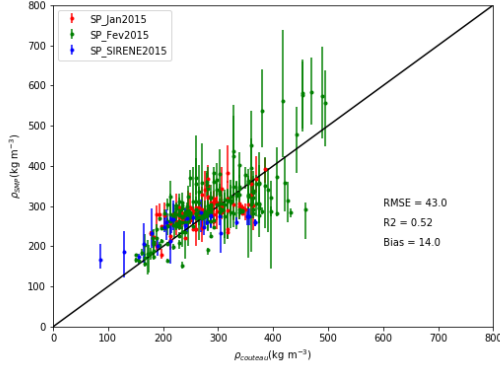
Pour compléter l'analyse de comparaison entre SMP et mesures in-situ de la densité et SSA, nous avons utilisé le jeu de données par couches de neige isolées, exploité et décrit à la Section 4 (Expérience par couche). Dans cette expérience, des couches de neige de 10 à 15 cm d'épaisseur, homogènes en densité et en SSA, ont été prélevées du manteau neigeux et mis sur une boîte en polystyrène. Les résultats sont montrés à la figure 8. Pour la densité de la neige, le nuage de points montre une dispersion similaire aux mesures des snowpits, alors que pour  $R_{opt}$ , la tendance dans le jeu de données par couche ne présente pas le biais observé précédemment, même si le traitement numérique a été strictement le même. Notons que pour cette expérience des couches, le nombre d'échantillons pour lesquelles les mesures SMP sont disponibles est limité (12 échantillons). Le jeu de données SMP par couche n'a pas été utilisé dans cette section pour l'analyse des simulations DMRT-ML.

Tableau 2 – Statistiques de la comparaison de  $\rho_{SMP}$  par rapport à  $\rho_{coucheau}$  (voir Fig. 7a )

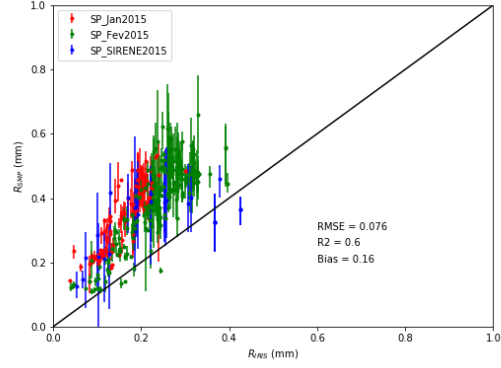
Campagne	Biais (kg m <sup>-3</sup> )	RMSE (kg m <sup>-3</sup> )	Pente	Ordonnée à l'origine (kg m <sup>-3</sup> )	$R^2$
Toutes	13.8	43.4	0.69	100.4	0.52
BJ_Jan2015	16.1	26.2	0.47	159.3	0.38
BJ_Fev2015	14.7	49.3	0.76	83.8	0.55
SIR2015	-3.23	22.3	0.34	162.0	0.55

Tableau 3 – Statistiques pour la comparaison de  $R_{SMP}$  par rapport à  $R_{IRIS}$  (voir Fig. 7b )

Campagne	Biais (m)	RMSE (m)	Pente	Ordonnée à l'origine (m)	$R^2$
Toutes	1.62E-04	7.57E-05	1.22	1.15E-04	0.60
BJ_Jan2015	1.82E-04	4.96E-05	1.76	5.77E-05	0.78
BJ_Fev2015	1.59E-04	6.91E-05	1.53	3.35E-05	0.70
SIR2015	1.04E-04	6.82E-05	0.48	2.23E-04	0.38

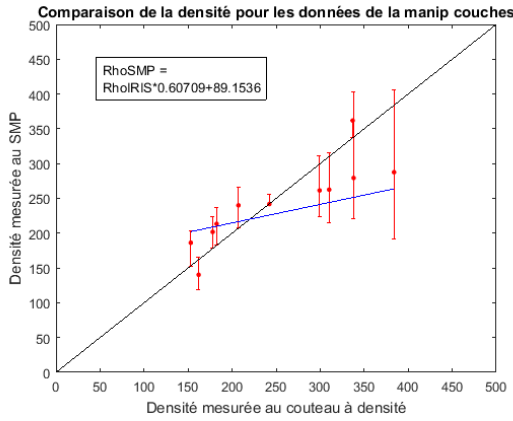


(a)  $\rho_{SMP}$  en fonction de  $\rho_{IRIS}$

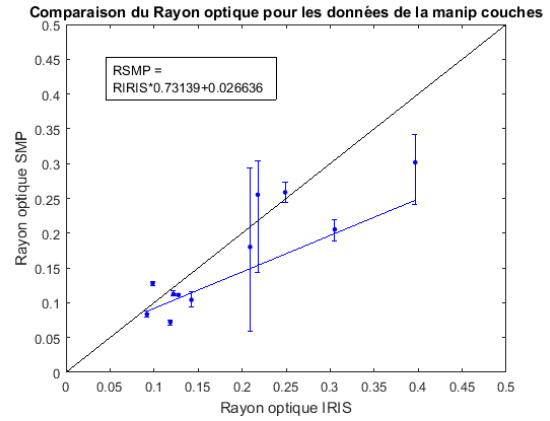


(b)  $R_{SMP}$  en fonction de  $R_{IRIS}$

Figure 7 – Comparaison à l'aide de diagrammes de dispersion pour les paramètres SMP et traditionnels. Les paramètres SMP sont moyennés sur l'échelle de 5 cm des mesures manuelles. Les barres verticales représentent ici les valeurs maximales et minimales obtenues pour l'ensemble des profils SMP de chaque site, alors que le point central utilisé pour le calcul de la régression, représente la moyenne des valeurs obtenues pour tous les profils.



(a)  $\rho_{SMP}$  en fonction de  $\rho_{IRIS}$



(b)  $R_{SMP}$  en fonction de  $R_{IRIS}$

Figure 8 – Comparaison des mesures au SMP et traditionnelles de  $\rho$  et de  $R_{opt}$  pour le jeu de données des couches homogènes qui sera analysé avec plus de détails dans la Section 4.

### 3.2.2 Analyse des $T_B$ simulés pour des profils d'intrants à 5 cm

Nous comparons ici le résultat de simulations réalisées à l'aide de DMRT-ML, en prenant pour paramètres d'entrée les différentes combinaisons de mesures de densité et de taille de grains moyennées sur une échelle de 5 cm. Pour chacune des différentes combinaisons de paramètres d'entrée, une inversion en fonction du coefficient  $\Phi$  est réalisée de manière à minimiser la  $RMSE$  à 37GHz en polarisation verticale (37V); la valeur qui minimise la  $RMSE$  est notée  $\Phi_0$ . Une fois ce paramètre  $\Phi_0$  déterminé, la modélisation

est réalisée pour toutes les fréquences et polarisations. Les résultats sont représentés dans la figure 9 avec l'analyse statistique au tableau 4.

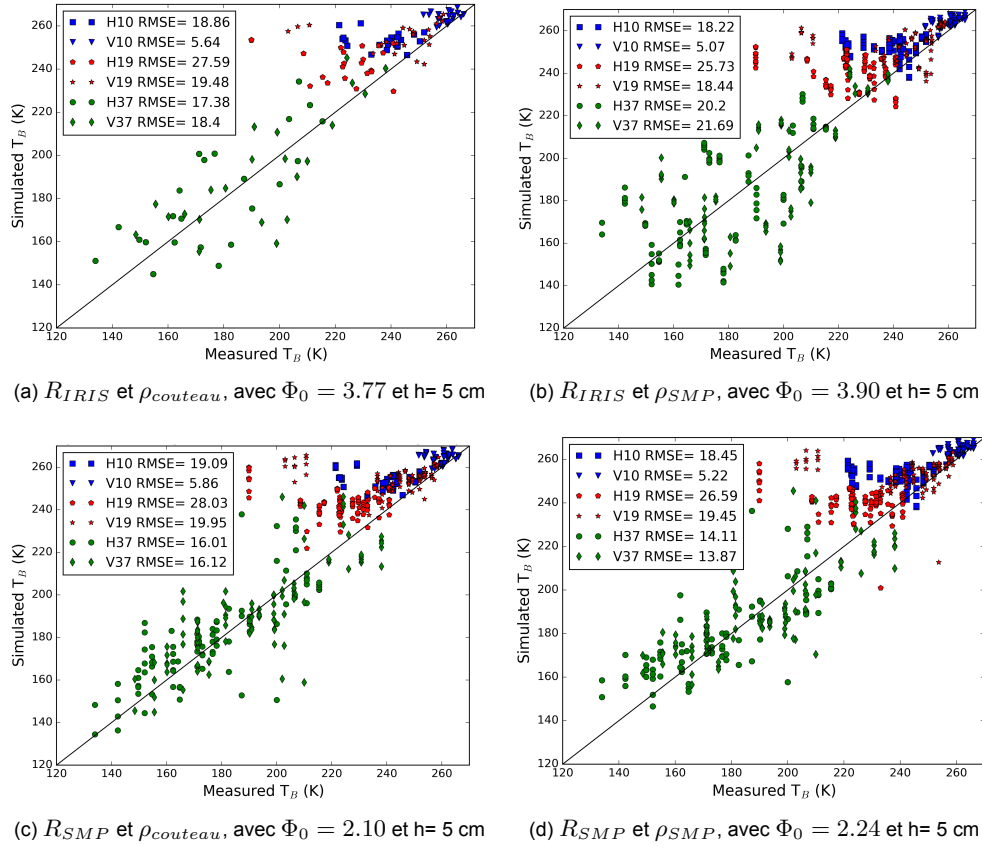


Figure 9 – Comparaison des  $T_B$  simulés avec le modèle DMRT-ML par rapport aux valeurs mesurées pour 3 fréquences (11, 19 et 37 GHz et pour quatre combinaisons de paramètres d'entrée (a,b,c, et d) sur un pas d'échantillonnage de 5 cm. Pour chacun des cas, le facteur multiplicatif optimisé est noté  $\Phi_0$

Tableau 4 – Propriétés statistiques de modélisation pour le  $\Phi_0$  (couche de 5 cm)

Param $R$	Param $\rho$	$\Phi_0$	$RMSE_{37V}$	$Bias_{37V}$	$R^2_{37V}$	$pente_{37V}$	$RMSE_{glob}$	$Bias_{glob}$	$R^2_{glob}$	$pente_{glob}$
$R_{IRIS}$	$\rho_{couteau}$	3.77	18.4	-0.2	0.55	0.82	19.0	-9.2	0.78	0.96
$R_{IRIS}$	$\rho_{SMP}$	3.90	21.7	-0.6	0.42	0.74	19.3	-8.6	0.77	0.94
$R_{SMP}$	$\rho_{couteau}$	2.10	16.1	-1.0	0.59	0.75	18.7	-9.7	0.79	0.93
$R_{SMP}$	$\rho_{SMP}$	2.24	13.9	0.3	0.67	0.70	17.5	-8.4	0.80	0.93

Il est à noter que les points simulés dans les figures  $T_B$  (b), (c) et (d) comportent beaucoup plus de points que la figure 9(a). En effet, les combinaisons de paramètres pour lesquelles le SMP est utilisé, les plusieurs profils SMP réalisés à chaque site étudié donnent des sorties de modèle différents alors que pour les mesures manuelles, un seul résultat est obtenu. Le calcul des paramètres n'est pas affecté par ce changement du nombre de points. D'autre part nous avons également fait des tests en moyennant les

valeurs modélisées pour chaque profil SMP (non montré ici) ce qui donnait des résultats similaires à ceux montrés à la figure 9. On remarque que les points à 37 GHz sont meilleurs pour les deux combinaisons utilisant le  $R_{SMP}$  qui se retrouvent aux Figures (c) et (d), avec respectivement des  $RMSE_{37V}$  de 13.9 et de 16.1 K. Cette amélioration est également présente mais plus faible aux fréquences de 19 et de 11GHz, ce qui s'explique parce que ces fréquences sont moins sensibles à la microstructure.

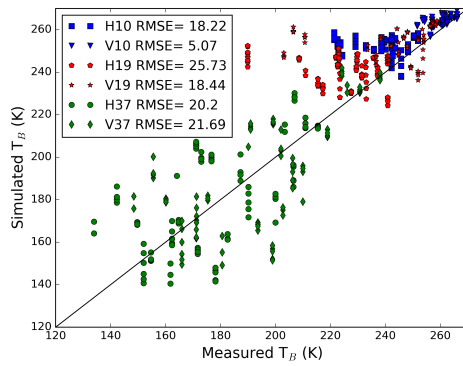
On note aussi que le facteur de correction sur la taille optimal  $\Phi_0$  est plus grand pour les mesures réalisées avec le paramètre  $R_{IRIS}$  (3.77 et 3.90) par rapport aux mesures du  $R_{SMP}$  (2.10 et 2.24) respectivement pour les densités  $\rho_{couteau}$  et  $\rho_{SMP}$  (voir tableau 4). Cette différence s'explique par la Figure 7b où l'on observe que les valeurs de  $R_{SMP}$  sont systématiquement plus élevées que celles de  $R_{IRIS}$ .

Un problème possible avec le résultat actuel découle de la possibilité que le facteur multiplicatif appliqué sur la valeur de  $R_{SMP}$  compense non seulement la diffusion, mais également l'imprécision sur l'absorption. Ainsi, l'augmentation dans l'entrée du modèle de la taille des grains qui fait changer la valeur du coefficient de diffusion pourrait compenser une mauvaise estimation de l'absorption qui provient directement de la mesure de densité. En effet, comme on peut le remarquer à la figure 8a, la représentation du  $\rho_{SMP}$  n'est pas parfaite et c'est cette valeur qui a été employée pour calculer le coefficient d'absorption de la neige. Pour mieux comprendre cette possibilité, des analyses supplémentaires ont été réalisées, en remplaçant la valeur du paramètre  $\rho_{SMP}$  par une valeur calibrée par la relation linéaire mise en évidence au tableau 2  $\rho_{SMPcalib}$  et en utilisant cette nouvelle valeur pour calculer le  $R_{SMPcalib}$ . Les graphiques et tableaux de cette analyse sont disponibles en annexe (figure 43 et tableau 20). Cette expérience donne des valeurs de  $\Phi_0$  encore plus faibles que les valeurs obtenues plus tôt, et les valeurs de RMSE 37V augmentent. La calibration des valeurs dérivées SMP sera à investiguer plus en profondeur.

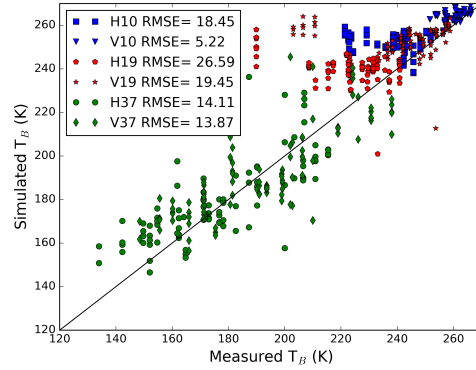
### 3.2.3 Analyse de l'épaisseur de la couche SMP optimale

Dans cette section, nous évaluons l'effet d'un changement de la fenêtre d'échantillonnage sur les mesure SMP considéré sur la précision du modèle DMRT-ML. Ainsi, à la Figure 10, nous avons repris deux combinaisons de paramètres qui semblaient prometteuses :  $R_{IRIS}$  et  $\rho_{SMP}$ ; et  $R_{SMP}$  et  $\rho_{SMP}$ , en les comparant pour une hauteur (h) de couche de 5 cm et de 1 cm. Le résultat de l'erreur quadratique pour chaque fréquence et polarisation est visible sur chacune des figures 10, et les valeurs globales (toutes les fréquences et polarisations) sont reportées au tableau 5.

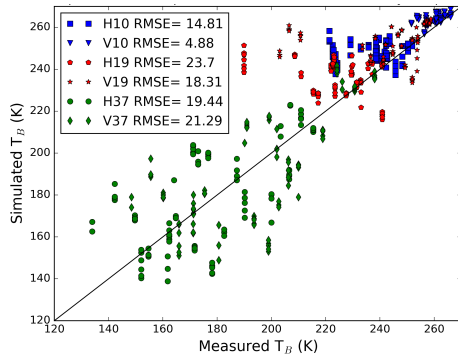
Nous observons une amélioration plus importante pour la polarisation H, particulièrement à 10 GHz (-3.4 K) en diminuant ainsi l'épaisseur des couches. Globalement, le changement du pas d'échantillonnage améliore très faiblement l'erreur de simulation ; Les meilleurs résultats sont obtenus pour la combinaison de paramètres  $\rho_{SMP}$  et  $R_{SMP}$  (voir figure 10 (d)) à une épaisseur de couche de 1 cm. Nous avons testé des couches encore plus fines de densité ou rayon optique, mais une telle paramétrisation rendait les calculs très long sans aucune amélioration significative (non montré).



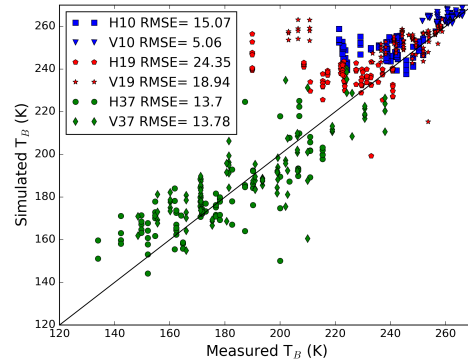
(a)  $R_{IRIS}$  et  $\rho_{SMP}$ , avec  $\Phi = 3.90$  et  $h = 5$  cm



(b)  $R_{SMP}$  et  $\rho_{SMP}$ , avec  $\Phi = 2.24$  et  $h = 5$  cm



(c)  $R_{IRIS}$  et  $\rho_{SMP}$ , avec  $\Phi = 3.94$  et  $h = 1$  cm



(d)  $R_{SMP}$  et  $\rho_{SMP}$ , avec  $\Phi = 2.20$  et  $h = 1$  cm

Figure 10 – Effet d'un changement de l'épaisseur des couches (h) entre 5 et 1 cm pour les combinaisons de paramètres les plus intéressantes

Notez que nous avons aussi essayé de calibrer les données SMP en les corrigeant par rapport aux mesures manuelles à 5 cm à partir de la relation linéaire de l'histogramme (voir figure 7). Les résultats (non montrés) ne sont pas meilleurs, quelle que soit l'épaisseur de couche considérée (5 ou 1 cm). Ceci pourrait s'expliquer par le fait que les simulations de  $T_B$  sont en fait recalées par le facteur  $\Phi$ , qui calibre le SMP.

Tableau 5 – Erreurs de simulation selon le pas d'échantillonnage (épaisseur des couches) pour  $R_{IRIS}$  et  $\rho_{SMP}$ . On rappelle en première ligne la valeur de départ avec les mesures in-situ tous les 5 cm.

Param $R$	Param $\rho$	Hauteur des couches (cm)	$\Phi_0$	$RMSE_{min37V}$ (K)	$BIAS_{37V}$	$RMSE_{glob}(K)$	$BIAS_{glob}$
$R_{IRIS}$	$\rho_{couteau}$	5	3.77	18.4	-0.39	18.7	-9.02
$R_{IRIS}$	$\rho_{SMP}$	5	3.91	21.7	-0.16	19.0	-6.68
$R_{IRIS}$	$\rho_{SMP}$	1	3.94	21.3	-0.56	18.0	-8.56
$R_{SMP}$	$\rho_{SMP}$	5	2.24	13.9	-0.16	17.3	-7.03
$R_{SMP}$	$\rho_{SMP}$	1	2.21	13.8	0.28	16.0	-8.39

### 3.3 Discussion

Dans ce chapitre, nous avons montré que l'utilisation du SMP pouvait apporter une information sur la microstructure de la neige qui améliorait les simulations de  $T_B$  avec DMRT-ML. Les résultats sur 32 snowpits de neiges nordiques et subarctiques très différentes montrent que les meilleurs résultats sont obtenus avec la combinaison des paramètres SMP rééchantillonnés à 1 cm (voir figure 10 (d)), apportant une diminution de l'erreur quadratique moyenne de 16% ( $-3$  K) (toutes fréquences et polarisation H et V confondue) en comparaison aux mesures traditionnelles in-situ effectuées tous les 5 cm dans le manteau neigeux. À 37 GHz, l'amélioration est plus significative ( $-5$  K,  $-25\%$ ). Ces résultats montrent le potentiel de l'utilisation du SMP pour mesurer les caractéristiques de la microstructure pour les modèles de transfert radiatif, et étant donné la prise de mesure beaucoup plus rapide que les méthodes traditionnelles de mesure des propriétés de la neige, le SMP pourrait permettre de mieux comprendre l'effet de la variabilité des caractéristiques du couvert nival à petite et moyenne échelle spatiale sur les observations micro-ondes passives.



## 4 Expérience de caractérisation des couches de neige homogènes

Ce chapitre concerne l'expérience de caractérisation des propriétés radiométriques des couches de neiges homogènes extraites du manteau neigeux. Ces expériences ont été réalisées au cours des hivers 2016 et 2017 aux sites d'études d'Umiujaq, Montmorency et Sirene. L'objectif de cette expérience est de comparer directement la longueur de corrélation ainsi que les coefficients d'absorption et de diffusion inversés des mesures radiométriques aux propriétés microstructurales de chacune des couches.

76 échantillons de neige ont été extraites du manteau neigeux et analysées à l'aide d'un montage spécifique conçu pour le terrain (tel qu'illustré à la Figure 11b). Des couches de neige homogène d'une épaisseur de 10 à 15 cm ont été choisies et échantillonnées à même le manteau neigeux, puis transférée dans une boîte en polystyrène. Cette couche est déposée dans le champ de mesure de chacun des radiomètres successivement sur un substrat formée d'une plaque métallique réfléchissante et d'un absorbeur pyramidal conçu pour absorber les fréquences micro-ondes. Chaque échantillon est ensuite caractérisé avec précision à l'aide des instruments microstructuraux traditionnels décrits au chapitre 3 (densité de la neige :  $\rho_{Couteau}$  et  $SSA_{IRIS}$ ). Nous présentons ci-dessous les résultats les plus significatifs sur l'analyse de la longueur de corrélation inversés puis sur l'analyse des coefficients de diffusion. L'ensemble des résultats sont reportés en annexes.

### 4.1 Méthode

#### 4.1.1 Données de l'expérience couche

Le tableau 6 résume le jeu de données extrait. Les couches ont été choisies à différentes hauteurs dans le manteau neigeux pour chaque snowpit considéré dans le but de maximiser la diversité des textures de neige et des types de grains mesurés. Une fois les couches choisies après l'étude stratigraphique des snowpits, elles ont été excavées avec soin hors du manteau neigeux à l'aide d'un échantillonneur en aluminium de 55 cm  $\times$  75 cm et de 15 cm de hauteur conçu pour la manipulation, montré à la figure 11b). L'avant et l'arrière de la couche sont coupées par une lame d'aluminium de 55 cm  $\times$  15 cm, puis l'ensemble est détaché du manteau neigeux. Ces couches sont ensuite méticuleusement transférées vers une boîte en polystyrène, et leur surface lissée à une épaisseur constante. Suite aux mesures radiométriques (voir la section 4.1.2), leur caractérisation (microstructure et densité) est réalisée. Sur les 86 couches extraites au cours des hivers 2016 et 2017, seuls les 76 échantillons récoltés en 2016 sont utilisés pour les analyses présentées dans le présent document.

Pour chaque couche, entre 3 et 5 mesures de hauteur, densité ( $\rho_{\text{couteau}}$ ),  $SSA_{IRIS}$  et température ( $T$ ) ont été réalisées puis moyennées. Le très faible écart entre ces mesures confirme l'homogénéité des couches. Ces 76 couches présentent les valeurs moyennes de densité de  $267 \pm 74.5 \text{ kg} \cdot \text{m}^{-3}$  (min : 108, max : 425), sur une épaisseur moyenne de  $10.9 \pm 3.2 \text{ cm}$  (min : 16.4, max : 4.5 cm ), donnant un EEN moyen de  $29.6 \pm 12.6 \text{ mm}$  (min : 60.1, max : 5.4). Les mesures de SSA ont donné un rayon optique ( $R_{IRIS}$ ) moyen de  $0.17 \pm 0.1 \text{ mm}$  (min : 0.4, max : 0.04). Une photographie des grains de neige a aussi été réalisée pour chaque couche, permettant à la fois d'estimer la taille visuelle des grains en fonction de leur étendue maximale, et de classifier les types de grains (analyse visuelle) en suivant la classification internationale des types de neige sur le sol de l'IACS [17]. Finalement, nous notons si la couche est bel et bien homogène, et si la couche a été fragmentée lors de la manipulation devant les radiomètres. Ces critères sont notés dans les tableaux par 1 ou 0 pour indiquer si oui ou non la couche est homogène, si la couche est craquée, et finalement la dernière colonne indique si la couche est à la fois homogène et non craquée. Le détail des couches sélectionnées pour les deux campagnes de 2016 et 2017 sont décrits en annexe (figures 24 à 35) et les résultats de l'ensemble des mesures réalisées dans ces couches se trouvent dans les Tableaux 13 à 15 en annexe.

Tableau 6 – Sites de mesure de l'expérience couche pour les campagnes de 2016 et 2017

Site	Nom Snowpit	Nb couches	Date	Heure	Latitude (°N)	Longitude (°W)
Montmorency 2016	MOREX_SP1	4	2016-01-12	14h00	47.324	71.149
Montmorency 2016	MOREX_SP2	7	2016-01-13	10h57	47.323	71.150
Montmorency 2016	MOREX_SP3	7	2016-01-14	9h21	47.320	71.149
Montmorency 2016	MOREX2_SP1	7	2016-02-09	13h00	47.323	71.151
Montmorency 2016	MOREX2_SP2	6	2016-02-10	08h36	47.323	71.151
Montmorency 2016	MOREX3_SP1	3	2016-03-07	9h44	47.322	71.151
Montmorency 2016	MOREX3_SP2	6	2016-03-08	8h22	47.323	71.150
Umiujaq 2016	maison_sp1	5	2016-02-18	11h00	56.551	76.551
Umiujaq 2016	Tundra_SP1	4	2016-02-19	9h30	56.560	76.481
Umiujaq 2016	Tundra_SP1	3	2016-02-19	13h30	56.560	76.480
Umiujaq 2016	foret_sp3	5	2016-02-20	12h00	56.550	76.470
Umiujaq 2016	Arbustes_SP4	4	2016-02-21	9h00	56.536	76.432
Umiujaq 2016	lac_SP4	2	2016-02-21	11h00	56.534	76.422
Umiujaq 2016	Foret_SP5	8	2016-02-22	11h00	56.551	76.471
Umiujaq 2016	Tundra_SP6	5	2016-02-23	9h00	56.560	76.482
Montmorency 2017	SP1_MOMO	2	2017-01-19	11h	47.323	71.151
Montmorency 2017	SP2_MOMO	2	2017-01-19	9h	47.323	71.151
Montmorency 2017	SP3_MOMO	1	2017-01-19	14h	47.323	71.151
Montmorency 2017	SP4_MOMO	1	2017-01-19	14h	47.323	71.151
Montmorency 2017	SP5_MOMO	1	2017-01-19	14h	47.323	71.151
Umiujaq 2017	Maison	1	2017-03-21	12h30	56.551	76.471
Umiujaq 2017	sp2_UMI	2	2017-03-21	14h	56.551	76.470

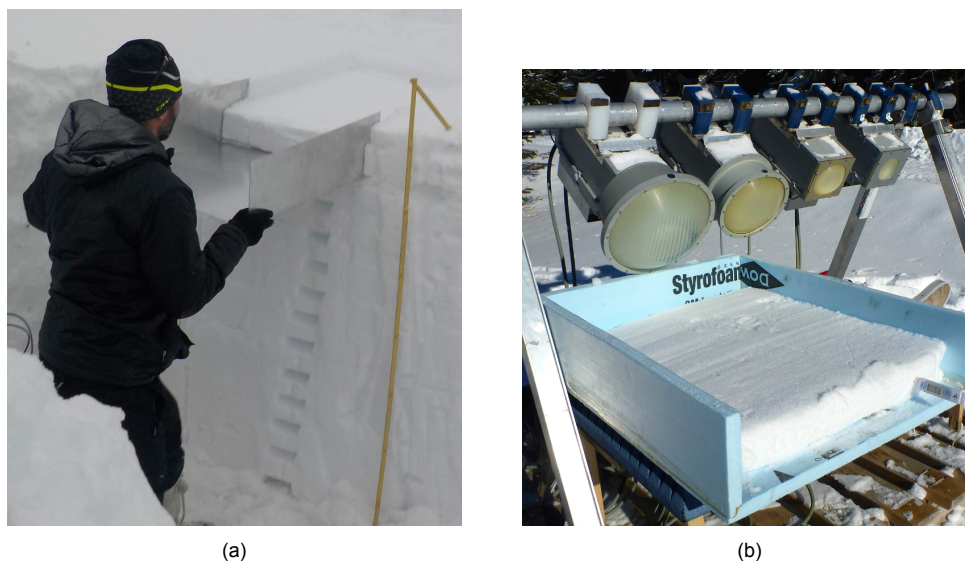


Figure 11 – **11a** Prélèvement d'une couche homogène dans le manteau neigeux et **11b** couche transférée dans sa boîte de polystyrène

Tableau 7 – Exemple de mesures des propriétés radiométriques d'une couche

Échantillon	Fréquence (GHz)	$T_B$ réflecteur + neige(K)		$T_B$ réflecteur (K)		$T_B$ absorbeur + neige (K)		$T_B$ absorbeur (K)		$T_B$ ciel (K)		T Abs °C
		H	V	H	V	H	V	H	V	H	V	
MOREX_SP1_Couche 1	10	15.7	21.1	36.6	31.4	242.3	179.4	254.7	251.7	—	—	-12.8
	19	52.9	51.6	83.3	76.1	233.8	192.0	253.9	245.5	3.2	3.5	-12.8
	37	109.5	104.8	80.9	79.1	220.6	201.3	258.2	255.2	38.3	37.0	-12.8
	89	160.8	151.2	58.4	60.1	173.9	161.8	247.9	245.3	23.1	23.5	-12.8

#### 4.1.2 Caractérisation radiométrique des couches

Le polystyrène est choisi comme matériau pour les parois de la boîte de neige parce qu'il s'agit d'un matériau qui affecte peu les radiations micro-ondes, avec une permittivité proche de celle de l'air, comme exposé dans la méthode de l'étude de Wiesmann et al., 1998[61]. Cette boîte avec la neige est déposée devant chaque radiomètre, successivement sur un absorbeur micro-onde qui agit comme un corps noir, puis sur une plaque d'aluminium qui constitue un réflecteur parfait (Fig. 12 ). Pour ces deux configurations, la  $T_B$  est mesurée avec les SBR, qui opèrent aux fréquences de 10.67, 19.0, 37.0 et 89.0 GHz, orientés avec un angle d'incidence de  $55^\circ$  par rapport au nadir.

De plus, pour chaque couche, une mesure de la boîte vide posée sur chaque substrat a été effectuée. La température du corps noir a été mesurée à l'aide d'un thermomètre, et le  $T_{B\ sky}$  a été mesuré en pointant le radiomètre directement vers le zénith. Un exemple de mesures radiométrique est présenté au tableau 7. De plus, l'ensemble des mesures radiométriques est disponible en annexe dans les tableaux 16 à 19 qui se trouvent dans l'annexe.

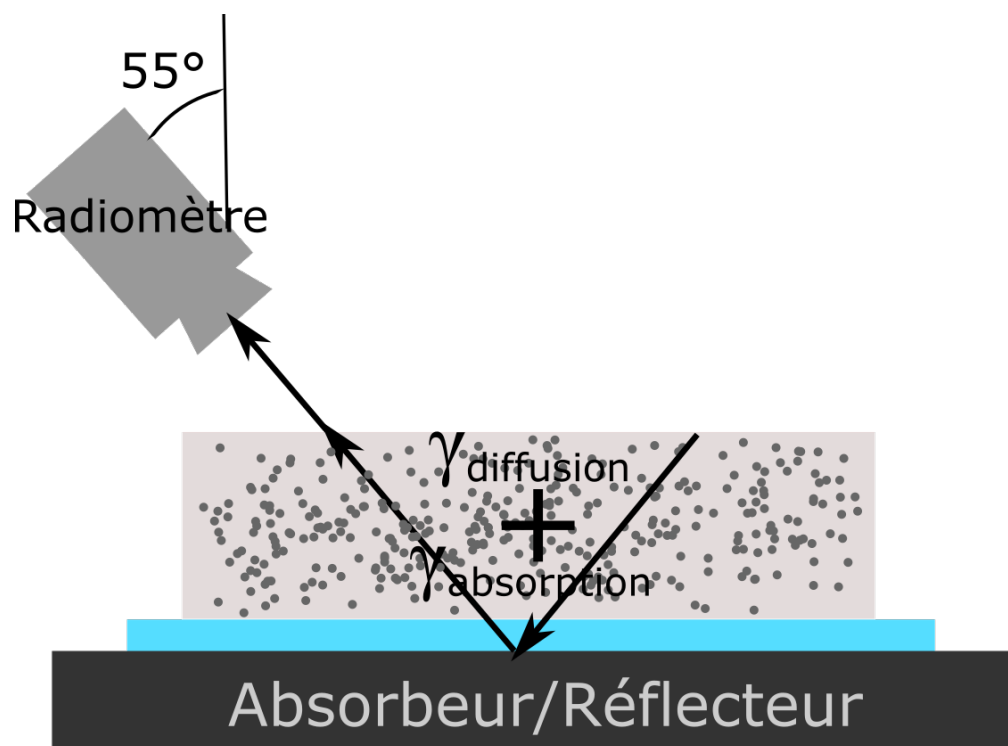


Figure 12 – Schéma de la mesure radiométrique effectuée sur une couche

## 4.2 Vérification de la validité des mesures radiométriques

Dans un premier temps, nous avons vérifié la validité des données et la performance du protocole expérimental, en particulier en étudiant l'effet du polystyrène sur les mesures de la neige et l'effet de la contribution atmosphérique.

### 4.2.1 Effet de l'atmosphère

La contribution du rayonnement de l'atmosphère vers le bas ( $T_{B\ Down}$ ) peut être estimée à partir de la concentration d'eau précipitable dans la colonne atmosphérique ( $PWAT$ ). Cette valeur est calculée par une régression linéaire entre l'émission du ciel (modèle de transfert radiatif implémenté dans le modèle de finlandais du Helsinki University of Technology HUT (Pulliainen et al., 1999[44]) et le  $PWAT$  exprimé en mm d'eau. Cette régression est calibrée pour chaque fréquence (Roy, et al., 2014[46]). Le paramètre  $PWAT$  est obtenu des réanalyses atmosphériques NARR (Messinger et al., 2006[33]) à la latitude, longitude et l'heure précise de la mesure radiométrique. Cependant, la  $T_B$  du ciel mesurée au nadir ( $T_{B\ sky}$ ) n'est pas tout à fait égale à la valeur modélisée ( $T_{B\ Down}$ ) du fait de la variation de la transmission atmosphérique (voir Mätzler et al., 2007[32]). Aussi, on suppose ici un ciel homogène dans toutes les directions.

Dans la Figure 13, on compare les mesures du rayonnement du ciel au nadir ( $T_{B\ sky}$ ) par rapport aux valeurs de  $T_{B\ Down}$  calculées à partir des valeurs de  $PWAT$ . On observe que les points à 89 et 37 GHz se retrouvent de part et d'autre de la ligne d'égalité, mais une grande variabilité des mesures par rapports aux valeurs calculées qui peut résulter d'une inhomogénéité du ciel par rapport au nadir. Aussi, les valeurs négatives de  $T_{B\ sky}$  mesurées à 10 et 19 GHz où la contribution de l'atmosphère est très faible, montre un problème d'étalonnage des radiomètres qui sont calibrés à partir de mesures d'azote liquide à 77K et dont la validité n'est pas assurée pour les valeurs plus basses à cause de l'extrapolation de la calibration. Cela implique que le protocole tel qu'il a été réalisé n'est pas suffisamment précis pour utiliser ces résultats de faibles  $T_B$  à 10 et 19 GHz.

### 4.2.2 Effet de la couche de polystyrène mesurée sur l'absorbeur

La contribution d'une couche de polystyrène est négligeable en transmission : quand on compare une mesure avec et sans polystyrène au nadir (non montré), les mêmes valeurs de  $T_B$  sont retrouvées. À un angle d'incidence de  $55^\circ$  par rapport au nadir, nous avons vérifié que la réflexion de l'environnement sur le polystyrène peut être considéré comme négligeable au premier ordre. Le coefficient de réflexion à  $55^\circ$  peut théoriquement s'estimer par les mesures sur l'absorbeur à vide, tel que :

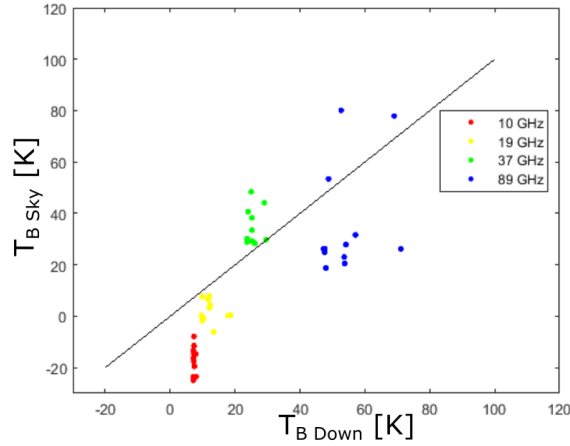


Figure 13 – Comparaison entre les  $T_{B \text{ sky}}$  mesurés en pointant les radiomètres au nadir par rapport aux valeurs de  $T_{B \text{ Down}}$  calculées à partir du *PWAT* des réanalyses NARR

$$T_{B \text{ abs vide}} = (1 - \gamma_{sty}) \cdot T_{abs} + \gamma_{sty} \cdot T_{B \text{ Down}} \quad (3)$$

$$\gamma_{sty} = \frac{T_{B \text{ abs vide}} - T_{abs}}{T_{B \text{ Down}} - T_{abs}} \quad (4)$$

Où  $T_{B \text{ abs vide}}$  est la température de brillance de l'absorbeur (corps noir) sous le polystyrène vide,  $T_{abs}$  est la température physique de l'absorbeur (mesurée),  $\gamma_{sty}$  est le coefficient de réflexion du polystyrène vide posé sur l'absorbeur. En pratique, comme  $\gamma_{sty}$  est proche de zéro, on a vérifié la relation  $T_{B \text{ abs vide}}$  en fonction de  $T_{abs}$ .

La figure 14 compare les mesures de  $T_B$  de l'absorbeur sous la boîte de polystyrène vide avec la température physique de l'absorbeur. On observe un léger biais qui peut correspondre au coefficient de réflexion moyen du polystyrène (tableau 8). On obtient donc un coefficient de réflexion de l'ordre de 0.02 à 0.04 pour les quatre fréquences, mais l'erreur sur cette valeur pour les 76 couches est du même ordre de grandeur que la valeur observée, ce qui nous indique que la prise en compte de cette correction ne sera pas très exacte. Il est possible qu'il y ait dans nos mesures un effet d'émission de l'environnement proche du polystyrène.

#### 4.2.3 Effet de la couche de polystyrène mesurée sur la plaque réfléchissante

On doit aussi vérifier la réflectivité de la plaque avec la boîte en polystyrène posé dessus la plaque métallique réfléchissante avec la relation suivante décrivant la mesure pour la boîte vide posée sur le substrat

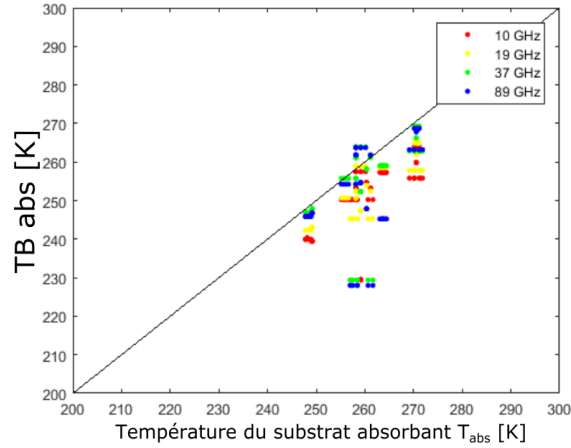


Figure 14 – Comparaison entre  $T_{B\ abs}$  pour l'absorbeur par rapport aux températures mesurées avec le thermomètre  $T_{abs}$ .

Tableau 8 – Valeurs du coefficient de réflexion du polystyrène  $\gamma_{sty}$

Fréquence	$\gamma_{sty}$
10 GHz	0.036 $\pm$ 0.025
19 GHz	0.027 $\pm$ 0.016
37 GHz	0.019 $\pm$ 0.037
89 GHz	0.031 $\pm$ 0.047

métallique :

$$T_{B\ met\ vide} = (1 - \gamma_{met}) \cdot T_{met} + \gamma_{met} \cdot T_{B\ Down} \quad (5)$$

où  $\gamma_{met}$  est le coefficient de réflexion global de la boîte de polystyrene posée sur la plaque de métal.

Comme les mesures radiométriques pour  $T_{B\ sky}$  ne sont pas bien calibrées, on a analysé l'équation 5 en considérant  $T_{B\ down}$  provenant de la valeur du PWAT calculée. La figure 15 montre le résultats en considérant que la température de la plaque est en équilibre avec l'air ambiant et donc avec la température de l'absorbeur mesurée presque en même temps (les deux expériences plaque et absorbeur se succèdent rapidement).

Puisque la réflectivité devrait être très proche de 1, cette équation 5 permet le calcul du coefficient  $\gamma_{met}$  par la relation :

$$\gamma_{met} \approx T_{B\ met\ vide} / T_{B\ Down} \quad (6)$$

On en déduit un coefficient de réflexion  $\gamma_{met}$  de l'ordre de 0.8 pour 37 et 89 GHz et proche de 1 pour les deux autres fréquences. Mais étant donné la variabilité des résultats, nous avons considéré par la suite la valeur de  $T_{B\ met\ vide}$  comme référence.

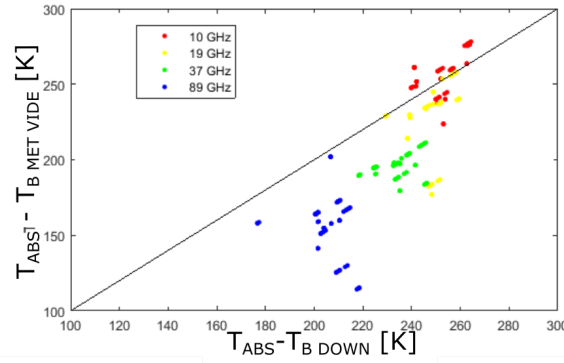


Figure 15 – Comparaison entre les  $T_B$  mesurés par le radiomètre avec le polystyrène sur la plaque de métal, par rapport à la  $T_B$  du ciel modélisée, en soustrayant la température de la plaque de polystyrène ( $T_{Abs}$ )

#### 4.2.4 Conclusion sur la validité des mesures radiométriques par couche

Il y a plusieurs sources de bruit et d'erreurs qui peuvent entacher les mesures. D'abord il est possible que le principe de la mesure par couche de dimension limitée génère des effets de réflexion par les bords de la plaque de neige. En effet, on se place habituellement dans des conditions de mesures semi-infinie dans le plan horizontal, ce qui n'est pas le cas ici. Il se peut aussi que pour les basses fréquences, les variations de l'effet d'absorption/diffusion recherché soit faible par rapport au signal total du fait que les couches sont minces (entre 10 et 15 cm). Typiquement, la profondeur de pénétration moyenne de la neige (e-folding) est de 10-15 m à 10 GHz, 3-5 m à 19 GHz, inférieure à 1 m à 37 GHz et inférieure à 20 cm à 89 GHz. Le signal de diffusion/absorption est donc d'autant plus faible que la fréquence est basse. Les expériences montrent en effet que les résultats à 10 et 19 GHz sont très bruités. Ils ont été reportés en annexe pour information. Seul les résultats à 37 et 89 GHz sont discutés dans le texte du mémoire.

D'autres sources d'erreur sont possiblement les problèmes de mauvais alignements entre les champs de vision des radiomètres, et/ou une contamination des mesures par l'émission de l'environnement immédiat du système de mesures. En effet, les radiomètres sont très inclinés (angle de visée du satellite) et proches des couches de neige pour des contraintes logistiques du montage. Le bruit observé peut enfin résulter d'un problème d'étalonnage des radiomètres aux très basses températures du ciel (nuage de points des figures 13 à 15). Bien que les radiomètres aient été calibrés avec de l'azote liquide (77 K) et un corps noir à température ambiante, les températures du ciel sont loin de la gamme de valeurs de cette calibration et peu donc diverger très rapidement

En pratique dans la suite des traitements, la température du substrat absorbant est fixée pour chaque couche par la mesure de  $T_{B\ vide\ abs}$  où on considère que la contribution atmosphérique est négligeable.



Pour la température du ciel descendante qui se réfléchit sur la neige on considère pour chaque couche les valeurs mesurées de  $T_B$  vide met.

L'analyse de la validité des mesures radiométrique par couche montre des sources d'erreurs non négligeables (bruit dans les mesures) qui rend les manipulations moins précises qu'il serait nécessaire d'avoir pour avoir des résultats suffisamment précis pour l'inversion des coefficients de diffusion.

### 4.3 Modèles d'inversion

Deux expériences d'inversion indépendantes ont été réalisées pour mettre en évidence des paramètres différents. D'une part la longueur de corrélation effective de la neige, c'est à dire la taille du paramètre de microstructure qui permet au modèle de mieux reproduire le signal radiométrique observé, a été obtenu par une inversion numérique en utilisant le modèle SMRT-IBA. D'autre part, les coefficients de diffusion et d'absorption du milieu neigeux ont été calculés en utilisant pour le calcul le modèle DMRT et un calcul du transfert radiatif à une couche utilisant un modèle à six flux. Étant donnée la faible épaisseur des couches (entre 5 et 15 cm) et la difficulté de réaliser les mesures (alignement, contamination par l'environnement, effets de diffusion et de réflexion par les bords de la couche dans la boîte de polystyrène, etc.), nous ne considérons ici que les mesures pour les fréquences de 37 et 89 GHz, qui donnaient ici des résultats plus significatifs que les autres fréquences pour lesquelles aucune tendance significative n'était discernable avec cette expérience. En effet, ces fréquences plus élevées ont généralement une interaction plus marquée avec la microstructure du manteau neigeux (plus faible profondeur de pénétration et plus forte interaction avec la neige). D'autre part, ces hautes fréquences sont également caractérisées par une plus forte contribution de l'atmosphère [31] et les mesures peuvent donc être sujettes à une variabilité difficile à éliminer du protocole expérimental.

#### 4.3.1 Méthodologie d'inversion de la longueur de corrélation effective

L'approche utilisée pour trouver le  $L_{eff}$  est de minimiser les différences entre les  $T_B$  des couches de neiges mesurées dans les configurations avec l'absorbeur et la plaque métallique et celles simulées à l'aide du modèle SMRT dans ces deux configurations en utilisant l'approche IBA (voir Mätzler, 1998 [29]) où la microstructure de la neige est définie par la longueur de corrélation  $L_{corr}$ , approchée par la fonction exponentielle ( $IBA_{exp}$ ). On a le système d'équation suivant :

$$T_{B \text{ abs snow}} = \epsilon_{snow} \cdot T_{snow} + (1 - \epsilon_{snow}) \cdot T_{B \text{ sky}} \quad (7)$$

$$T_{B \text{ met snow}} = \epsilon_{\text{snow}} \cdot T_{\text{snow}} + (1 - \epsilon_{\text{snow}}) \cdot T_{B \text{ sky}} \quad (8)$$

Où  $\epsilon_{\text{snow}}$  est l'émissivité de la neige calculée avec le modèle à une couche en considérant le substratum définie respectivement par  $T_{B \text{ vide abs}}$  avec l'absorbeur et  $T_{B \text{ vide met}}$  pour la plaque.  $T_{B \text{ sky}}$  est ici approximé par  $T_{B \text{ met vide}}$ . Il y a donc quatre équations pour l'absorbeur et plaque et les deux polarisations H et V. La valeur de la longueur de corrélation inversée est celle qui minimise l'erreur entre ces quatre valeurs simulées et les quatre valeurs mesurées.

Un exemple du procédé d'inversion utilisé est illustré à la figure 16 où en abscisse, il y a la longueur de corrélation (sur une plage allant du millimètre au micromètre) mise en entrée des simulations des  $T_B$  simulées. Les ronds correspondent aux  $T_B$  mesurées, alors que les symboles (+) correspondent aux valeurs qui minimisent l'erreur quadratique moyenne à toutes les polarisations, pour l'absorbeur et le réflecteur. Les points circulaires dont l'ordonnée représente la  $T_B$  mesurée sur la couche sur l'absorbeur (en bleu et rouge pour H et V) et sur le réflecteur (en vert et noir pour H et V); l'abscisse de ces points correspond à la valeur de longueur de corrélation calculée à partir de la  $SSA$  et de la densité  $\rho$ . Les courbes représentent l'ensemble des valeurs du modèle qu'il est possible d'obtenir en faisant varier  $L_{\text{corr}}$  sur une plage allant du millimètre au micromètre.

La longueur de corrélation exponentielle effective ( $L_{\text{eff}}$ ) inversée à partir du modèle SMRT IBA<sub>exp</sub> (voir Picard et al., 2018[39], voir aussi Krol et Löwe, 2016[21]), est liée à la  $SSA$  et à la densité de la couche par la relation de Debye, tel qu'exposé dans la partie théorique à l'équation 1. Cette relation a l'avantage d'établir un lien entre  $L_{\text{eff}}$  et les mesures réalisées sur le terrain de la  $SSA$  et de la densité. Dans la prochaine section, cette relation sert donc de référence. Sa signification est discutée dans Krol et Löwe (2016)[21] par rapport aux mesures rigoureuses réalisées par micro-tomographie.

#### 4.3.2 Méthodologie d'inversion des coefficients d'absorption et de diffusion avec la méthode du sandwich

Le calcul des coefficients d'absorption et de diffusion de la neige à partir des deux mesures des radiomètres d'une couche de neige posée successivement sur l'absorbeur (corps noir) puis sur la plaque métallique très réfléchissante est expliqué très en détail dans les publications de Weisman et al., (1999)[61], et aussi de Touré et al. (2008)[56] et Maslanka et al. (2016)[26] qui ont repris l'expérience. Le lecteur est invité à consulter ces articles pour les détails de la résolution de ce système de deux équations non-linéaires à deux inconnues : les coefficients d'absorption et de diffusion, contraints par les deux mesures (Eq. 7 et

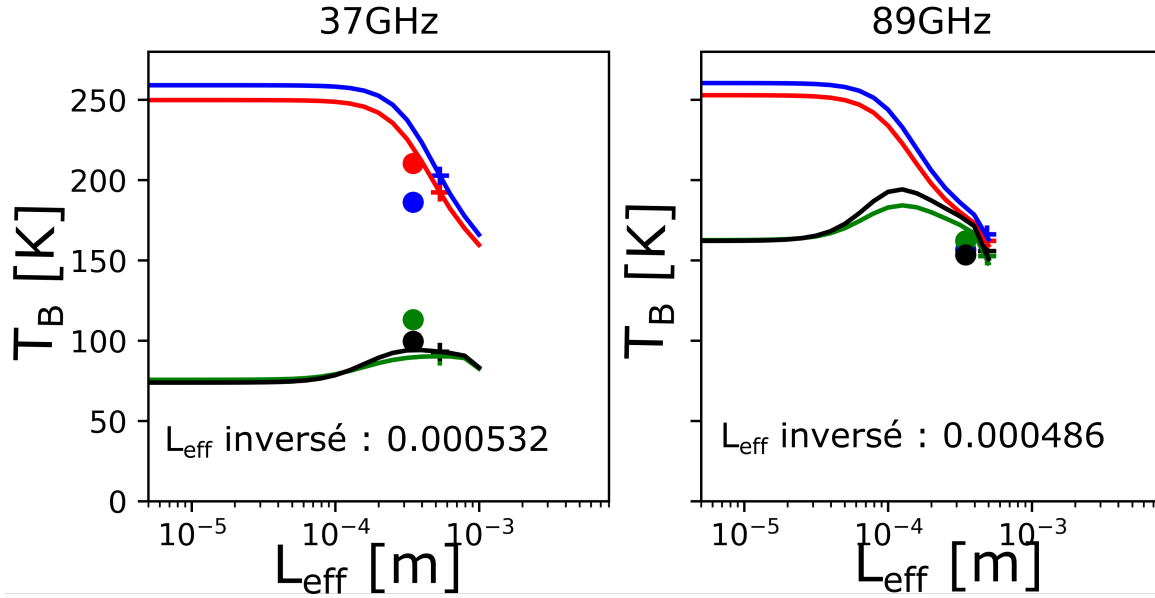


Figure 16 – Démonstration de l'inversion du paramètre de longueur de corrélation  $L$  à 37 et 89 GHz. En X : longueur de corrélation mis en entrée (en m), et en Y :  $T_B$  mesurés (points) et simulés (trait). En bleu et rouge : absorbeur (pour H et V) et en vert et noir : réflecteur (pour H et V). Les symboles en + sont les valeurs inversées minimisant l'erreur quadratique moyenne pour les quatre combinaisons.

8). Pour résoudre le système analytique par itération, il est nécessaire de simplifier le transfert radiatif, et comme Weismann et al., (1998)[60], nous avons utilisé un modèle simplifié de sandwich à 6-flux, qu'on suppose valable étant donné la relative homogénéité de la neige et la géométrie plan-parallèle des couches échantillonnées. Pour une fréquence et un angle d'incidence donnée, les paramètres d'entrée du modèle sont la hauteur de la couche, la densité qui permet de calculer la permittivité de la neige et la température de la couche.

Les résultats sur les coefficients de diffusion et d'absorption ont été comparés à ceux de Weismann et al. (1998)[60] (35 et 94 GHz) et Touré et al. (2009) (35 GHz), puis à ceux inversé à l'aide du modèle DMRT-ML. La dépendance fréquentielle de ces coefficients a aussi été analysée. Dans le modèle DMRT-ML, on a considéré dans ce travail l'approximation quasi-cristalline de premier ordre (QCA-CP, Quasi-Crystalline Approximation-Coherent Potential) et l'approximation de Percus-Yevick (Picard et al., 2013[38]), pour le calcul de la permittivité de la neige, considérant les diffusions multiples. Le transfert radiatif est résolu par le modèle DISORT (Discrete Ordinate Method), non limité à 6 flux (Picard et al., 2013[38], 2018[39]).

## 4.4 Résultats des analyses par couche

### 4.4.1 Longueur de corrélation

L'inversion de la longueur de corrélation effective ( $L_{eff}$ ) des mesures radiométriques à 89 GHz de la neige analysée par couche est comparée à la longueur de corrélation ( $L_{exp}$ ) selon la relation de Debye (Eq. 1) à la figure 17. La ligne bleue pointillée correspond au fit linéaire passant par 0. La ligne noire continue correspond à  $Y=X$  et la ligne tiretée est le fit de Krol et Löwe (2016)[21]). La couleur des points correspond au type de grains selon la classification internationale de Fierz et al. (2009)[17] : Givre de profondeur (DH), Neige fragmentée (DF), Grains à faces planes (FC), Grains ronds (MF), cristaux de neige fraîche (PP) et grains fins (RG). Des photos de ces différents types de neige sont montrées à l'annexe.

Une corrélation significative ( $R^2 = 0.73$ ) est obtenue, avec une dispersion plus forte des points pour les fortes valeurs de longueur de corrélation ( $L_{exp} > 0.15$  mm, correspondant globalement à des neiges de densité supérieure à  $200 \text{ kg} \cdot \text{m}^{-3}$  et une  $SSA$  inférieure à  $30 \text{ m}^2 \cdot \text{kg}^{-1}$ ). La pente de cette régression est de 1.21 soit supérieure à celle suggérée par Krol et Löwe (2016)[21] qui est de 0.794 (Fig. 18), valeur très proche de la valeur de 0.75 suggéré par Mätzler (2002)[30], la longueur de corrélation exponentielle a été mesurée au micro-CT. Cela signifie que pour minimiser l'erreur de simulation des  $T_B$  par rapport aux mesures, il faudrait augmenter la longueur de corrélation d'un facteur 1.21 lorsque dérivée des valeurs mesurées de  $SSA$  et densité de la neige. Montpetit et al. (2013)[36] (modèle MEMLS) et Céline Vargel (PhD en cours, communication personnelle, inversion sur 50 snowpits le long d'un transect Québec sud - subarctique, modèle SMRT IBA<sub>exp</sub>) ont trouvé un facteur 1.3, proche de nos mesures (si on considère la droite de regression qui ne passe pas par 0, on trouve :  $L_{inv} = 1.29 \cdot L_{Debye} - 0.013$ , en mm, avec une corrélation  $R^2 = 0.74$ ). La même expérience a été réalisé à 37 GHz (voir en annexe), et montre aussi une droite de régression significative :  $L_{inv} = 1.3L_{Debye} + 0.063$  et  $R^2 = 0.41$ . L'analyse par couche, qui a l'important avantage de ne pas considérer des valeurs moyennes à travers un manteau stratifié, confirme donc la validité de nos études précédentes.

La figure 17 montre aussi la distribution des types de grains de neige dans la relation observée. On peut la comparer à celle de Krol et Löwe (2016)[21] reportée à la Figure 18 où il apparait clairement un effet de dispersion selon le type de grain. En particulier, le givre de profondeur (DH) dans cette a des valeurs de longueur de corrélation exponentielle supérieure aux autres grains. Mais cet effet n'apparait pas aussi marqué dans nos résultats (Fig. 20), où l'on n'observe pas de tendance significative pour des point triangulaires associés au givre. Krol et Löwe (2016)[21] démontrent que cet effet de type de grain peut se

corriger par un facteur de forme dérivé de métriques définies au micro-CT, en se basant sur le fait que la cohésion des grains (ou leur « dispersité ») est liée à leur forme. Le problème est que ces métriques de forme, qui sont liés entre autres à la distribution des rayons de courbure des grains, ne sont pas mesurables sur le terrain.

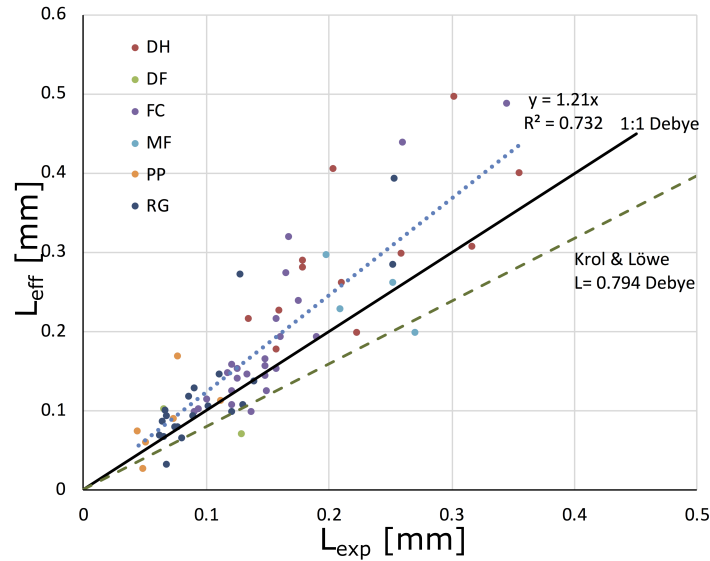


Figure 17 – Relation entre la longueur de corrélation effective ( $L_{eff}$ ) dérivée des inversions radiométriques en fonction de la longueur de corrélation ( $L_{exp}$ ) estimée par les mesures de la microstructure et la relation de Debye. La couleur des points correspond au type de grains selon la classification internationale de Fierz et al. (2009)[17] (voir texte).

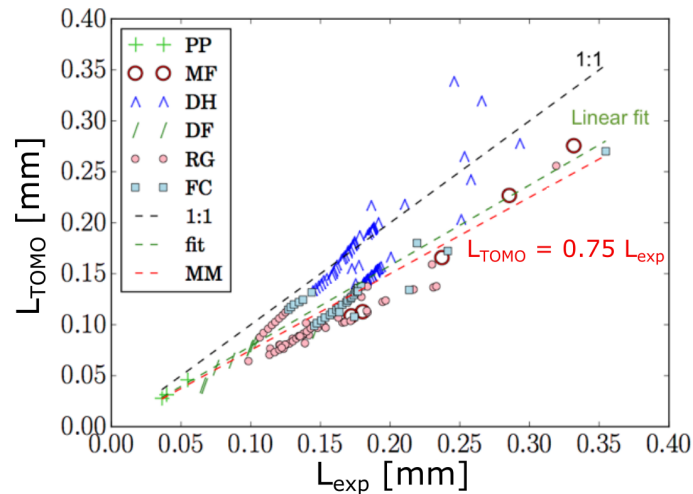


Figure 18 – Figure tirée de Krol et Löwe (2016)[21], Relation entre la longueur de corrélation exponentielle obtenue au  $\mu$ CT ( $L_{TOMO}$ ) et celle de Debye ( $L_{exp}$ ) calculée à partir des mesures de la SSA par l'équation 1. Le givre de profondeur (DH) dévie significativement du fit linéaire (pente de 0.794, tireté vert) vers un fit d'une pente de 1 (tireté noir). Voir la Figure 19 pour la définition des symboles.

Les études précédentes réalisées par inversion du modèle DMRT-ML (QCA-CP) ont aussi montré qu'il fallait corriger le paramètre de microstructure de la neige défini par les mesures au sol (SSA, densité) pour la radiométrie micro-onde. Cette correction peut se faire soit par un coefficient de cohésion ajusté (facteur de stickiness  $\tau$ , Larue et al., 2018[22]), soit par un facteur noté  $\Phi$  sur la SSA de la neige comme démontré à la section 3 de ce mémoire (voir aussi Roy et al., 2013[46]; Brucker et al., 2011[6]; Picard et al., 2014[37]). Ces études démontrent qu'il existe toujours un problème de définition de la microstructure de la neige pour la modélisation de la radiométrie micro-onde.

#### 4.4.2 Coefficients de diffusion de la neige par couche

Les graphiques présentés dans cette section représentent la relation entre les coefficients de diffusion calculés par la méthode du sandwich à 6 flux avec la densité, le rayon optique et la longueur de corrélation (Debye) de chaque couche. Ces résultats sont comparés avec ceux de la littérature et aussi avec l'inversion faite avec le modèle DMRT-ML. La variation fréquentielle des paramètres inversés sert aussi de validation à cette analyse. Une analyse équivalente pour les coefficients d'absorption est reportée en annexe.

L'analyse est présentée pour les fréquences 37 et 89 GHz (H en rouge et V en bleu) pour chaque type de grain (forme du symbole), et en tenant compte de la qualité des couches (symbole plein ou vide). En effet, certaines couches se sont brisées lors de la manipulation et nous avons voulu voir si cette brisure perturbait les résultats. La figure 19 résume la signification des symboles utilisés.

●	Couche parfaite, H
○	Couche brisée, H
●	Couche parfaite, V
○	Couche brisée, V
◇	Defrag
○	Melt Forms
☆	Rounded Grains
□	Facets
△	Depth Hoar

Figure 19 – Légende pour les graphiques suivants : La forme du point différencie les types de couches, la couleur représente la polarisation, alors que le remplissage détermine si la couche était homogène ou si elle a été fracturée.

Les figures 20 et 21 montrent les variations des coefficients de diffusion inversés respectivement en fonction du rayon optique et de la densité. Logiquement, la diffusion augmente quand ces paramètres de structure augmentent, mais cette relation est mieux définie pour le rayon optique (Fig. 20) que pour la densité (Fig. 21). À 89 GHz les relations linéaires sont plus significatives que celle à 37 GHz. Pour la densité à 89

GHz, un groupe de points défini par les grains arrondis (Rounded grain) et quelques points de givre de profondeur (Depth Hoar) semble se distinguer avec une pente plus faible (Fig. 21, droite). À 89 GHz, quand on ne considère que les couches non brisées (symboles pleins), les corrélations linéaires avec le rayon optique et la densité est meilleures ( $R_{parf}^2 > R^2$ ), alors que ce n'est pas le cas à 37 GHz.

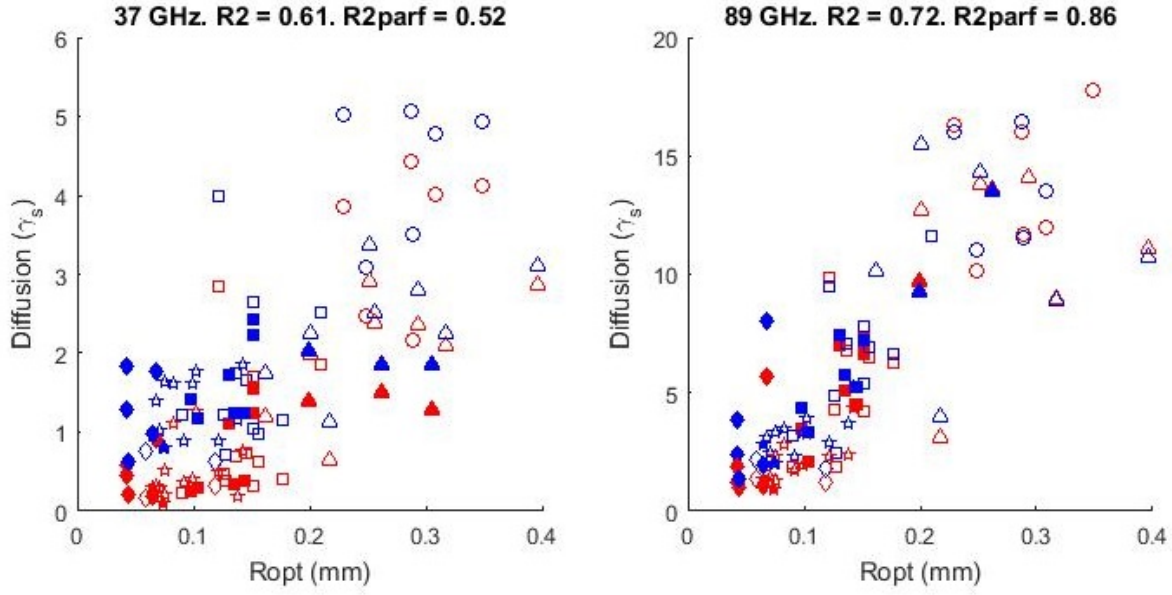


Figure 20 – Coefficient de diffusion  $\gamma_s$  (en 1/m) inversé en fonction du  $R_{opt}$  (en mm) dérivé des mesures de SSA des couches, à gauche pour 37 GHz et à droite pour 89 GHz.  $R^2$  correspond au coefficient de détermination linéaire de l'ensemble des points, alors que  $R2parf$  ne considère que les points aux couches non brisées (« parfaite ») tel que défini dans la dernière colonne des tableaux 13 à 15

La figure 22 montre les variations des coefficients de diffusion inversés en fonction de la longueur de corrélation des couches, estimée par la relation de Debye (Eq. 1) regroupant ainsi ces deux paramètres de microstructure. Le graphique est ici représenté sur une échelle log-log, pour comparaison avec les résultats de Weismann et al. (1998)[60] et de Touré et al. (2009)[56].

Par rapport à la théorie de Rayleigh, pour des sphères de rayon suffisamment petit par rapport à la longueur d'onde considérée, le coefficient de diffusion doit être proportionnel à  $f^4 L_{exp}^3$  où  $f$  est la fréquence et  $L_{exp}$  la longueur de corrélation. En admettant que l'on se situe dans ce régime de Rayleigh, il est possible de supposer une telle relation avec des exposants du même ordre de grandeur (4 et 3 respectivement pour  $f$  et  $L_{exp}$ ). Comme l'analyse en fréquence est séparable de l'analyse en  $L_{exp}$ , nous pouvons déterminer indépendamment les deux dépendances.

Le tableau 9 résume les paramètres des modèles exponentiels utilisés pour les fits par rapport aux points

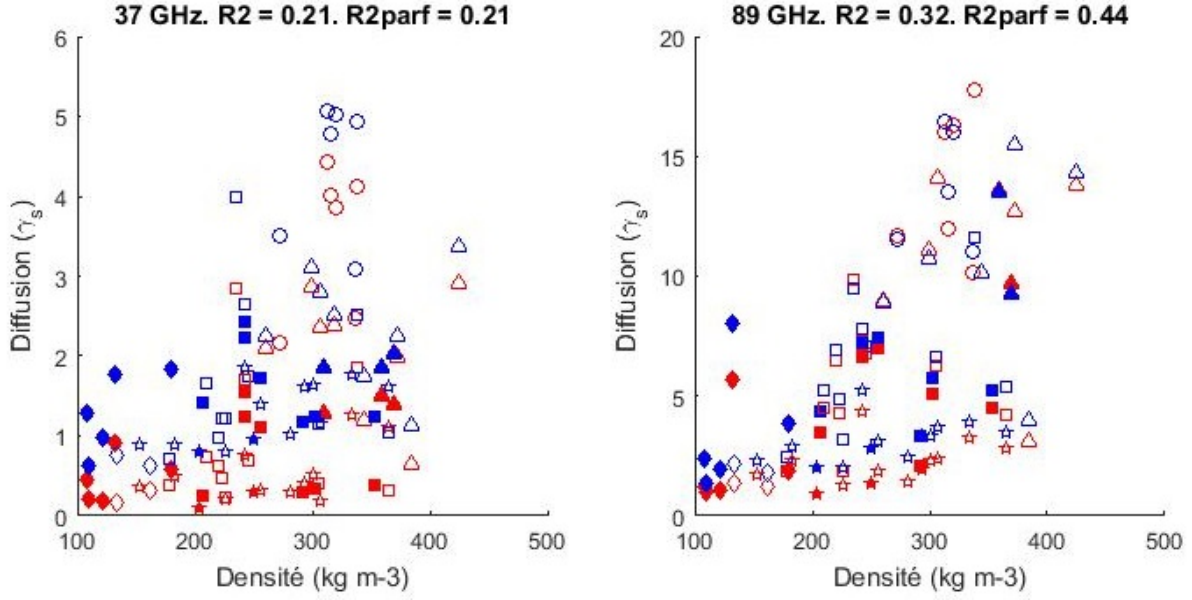


Figure 21 – Coefficient de diffusion  $\gamma_s$  inversé des couches (en  $1/m$ ) en fonction de la densité  $\rho$  (en  $kg \cdot m^{-3}$ ) à gauche pour 37 GHz et à droite pour 89 GHz.

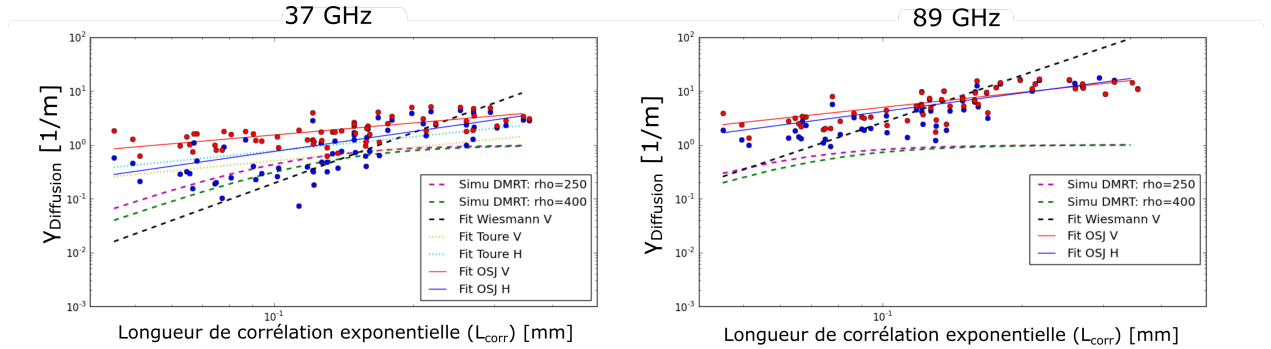


Figure 22 – Relation (en log-log) entre le coefficient de diffusion inversé des mesures micro-ondes en fonction de la longueur de corrélation  $L_{exp}$  (relation de Debye) (en mm) dérivée des mesures de SSA et densité, à 37 GHz à gauche et 89 GHz à droite. Les résultats (points et trait continu pour le fit statistique, noté OSJ : points rouges : H; points bleus : V) sont comparés aux modèles de Weismann et al. (1998)[60] et de Touré et al. (2009)[56], ainsi qu'aux simulations réalisées avec le modèle DMRT-ML pour deux densités différentes et avec un facteur d'optimisation correctif sur la taille des grains de 3.3 (facteur  $\Phi$ ).

mesurés, définie par la relation :

$$\gamma_{scat\ p} = d_3 \cdot (L_{corr})^{c_{p3}} \quad (9)$$

où  $\gamma_{scat\ p}$  et  $L_{exp}$  sont respectivement les coefficients de diffusion en polarisation  $p$  (H ou V) et la longueur de corrélation, et la constante  $d_3$  et l'exposant  $c_{p3}$  sont les paramètres d'ajustement du modèle.

Par rapport à l'étude de Weismann et al. (1998)[60], nos résultats sur les variations du coefficient de



Tableau 9 – Paramètres de régression comparés avec les résultats de Wiesmann et de Touré

Nom du fit	Frequence (GHz)	Coefficient $c_3$ V	$R^2$ V	Coefficient $c_3$ H	$R^2$ H
Wiesmann	21	2.95	0.58		
Wiesmann	35	3.13	0.9		
Wiesmann	94	2.91	0.87		
Toure	21	0.975	0.83	0.342	0.44
Toure	35	0.843	0.83	0.876	0.44
OSJ	10	0.47	0.11	0.41	0.16
OSJ	19	0.63	0.27	0.73	0.28
OSJ	37	0.74	0.42	1.23	0.52
OSJ	89	0.93	0.61	1.14	0.66

diffusion en fonction de  $L_{exp}$  (Fig.22) présentent une pente de variation (exposant  $c_3$  sur une échelle log-log) plus faible mais se compare bien à ceux de Touré et al. (2009)[56] autour de 37 GHz. Weismann et al. (1998)[60] retrouvait des valeurs de  $c_3$  proche de 3 en accord avec la théorie de Rayleigh aussi bien à 35 qu'à 94 GHz, bien que leurs mesures de taille de grains aient été dérivées d'analyse visuelle des grains, beaucoup moins précises, à priori, que celles de nos mesures SSA avec IRIS. Nos résultats montrent aussi qu'un biais systématique apparaît par rapport aux simulations DMRT-ML, significativement plus faibles, et non linéaires sur une échelle log-log. Il est difficile de trouver la cause réelle de ce biais. On trouve aussi que la dépendance spectrale du coefficient  $d_3 \approx f^{c_2}$  est égale à  $c_2 = 3.3$  pour nos valeurs sur les 2 fréquences en V étudiées (37 et 89 GHz) proche de la valeur attendue, alors que Weismann et al. (1998)[61] trouve  $c_2 = 2.24$  (sur 4 fréquences en V : 21, 35, 48 et 94 GHz; il n'y a pas de résultats en H dans cette étude).

L'analyse de la dépendance fréquentielle du coefficient de diffusion est réalisée selon la relation suivante, en accord avec la théorie de Rayleigh :

$$\gamma_{scat p} \sim (f)^{c_{p2}} \quad (10)$$

La figure 23 montre les variations du coefficient de diffusion en fonction de la fréquence (échelle log-log).

La moyenne des pentes (exposant  $c_2$ , Eq 10 ) est 2.01 en H et 1.33 en V, légèrement plus basse que la pente mesurée par Weismann et al. (1998) de l'ordre de  $2.55 \pm 0.47$  en polarisation V (15 échantillons, min. : 1.75, max. : 3.32). Ces valeurs de pente sont inférieures à celle de la théorie de Rayleigh ( $c_2 = 4$ ).

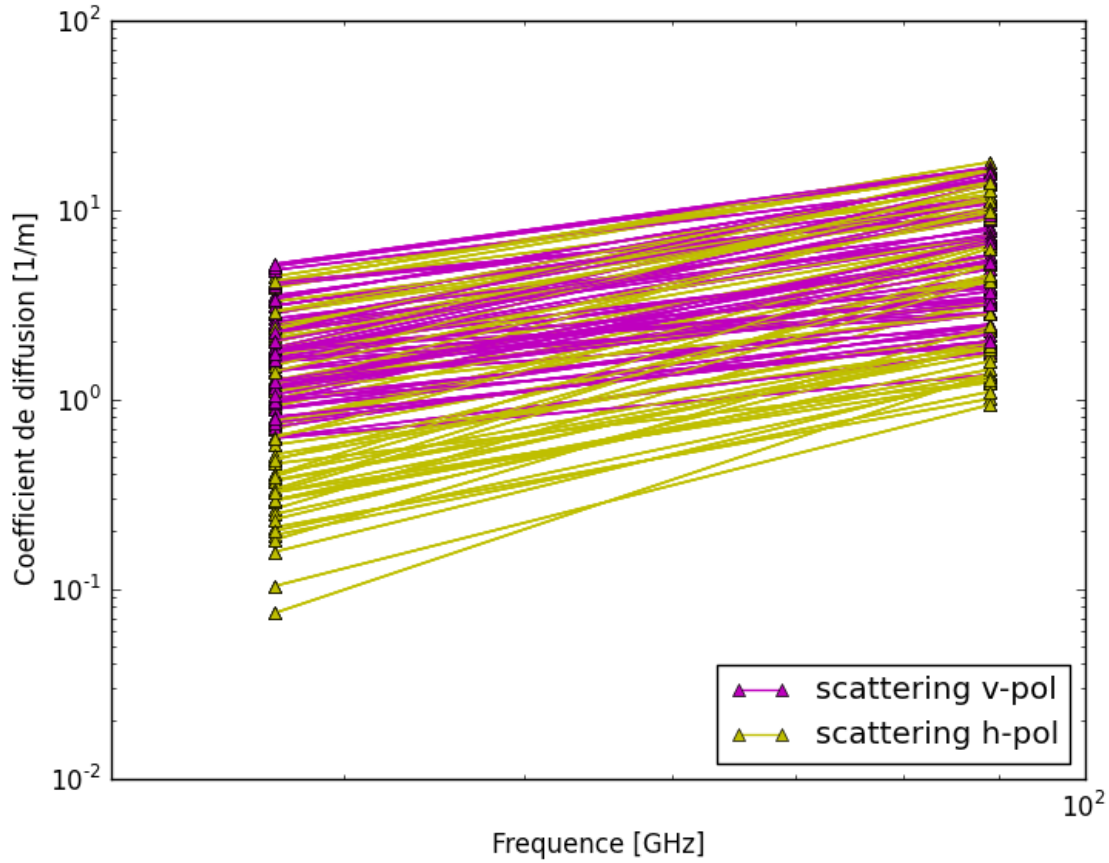


Figure 23 – Dépendance spectrale des coefficients de diffusions (échelle log-log) inversées des mesures par couche pour chaque polarisation (rose en V et jaune en H)

#### 4.5 Discussion

En conclusion de cette étude de la diffusion de la neige analysée par couche en fonction de sa microstructure définie par la longueur de corrélation, la taille des grains ( $r_{opt}$  dérivé de la SSA) et la densité, l'approche proposée dans cette étude paraît prometteuse car elle permet l'utilisation de couches de neige dont la structure est homogène. Cependant les mesures récoltées semblent affectées par des sources d'erreurs qui découlent probablement du protocole expérimental et de facteurs externes, tels que les effets environnementaux, la possibilité d'un mauvais alignement du champ de vue des radiomètres, l'erreur de mesures sur des couches pas assez épaisses, etc. Cette expérience est difficile à réaliser sur le terrain. L'inversion des coefficients de transfert radiatifs par l'approximation de la théorie 6-flux peut aussi être une source d'incertitude importante.

Si certains résultats sont cohérents avec la théorie ou les études précédentes (relation longueur de

corrélation inversée vs Debye), ce n'est pas le cas pour les variations des coefficients de diffusion inversés, comparées à la théorie de Rayleigh et comparées aux simulations DMRT-ML. Ces différences observées ne sont pour le moment pas explicables autrement que par l'hypothèse d'un manque de précision du protocole expérimental ou des appareils, et devrait faire l'objet d'une étude plus approfondie.

## 5 Conclusion

Cette étude sur le transfert radiatif micro-onde de la neige a été réalisée à partir de deux expériences originales, qui apportent des éléments d'analyse intéressants sur le problème de paramétrisation de la micro-structure de la neige, un problème toujours d'actualité.

La première expérience porte sur l'utilisation des données du micro-pénétromètre (SMP) comme intrant au modèle de transfert radiatif DMRT-ML. Elle démontre que l'utilisation des mesures du SMP permet de diminuer l'erreur de modélisation de l'émission micro-onde du couvert nival. L'utilisation combinée des données de densité de neige et de taille de grains issues du SMP ont permis d'obtenir les meilleurs résultats, en réduisant l'erreur quadratique des simulations par rapport aux mesures terrain de 4 à 5 K à 37 GHz. Une amélioration significative des résultats, mais moins marquée a également été observée lorsqu'on utilisait des paramétrisations SMP comme paramètre pour neige ou uniquement pour le  $R_{opt}$ . De plus, nous avons montré que l'amélioration de modélisation est un peu meilleur lorsque nous diminuons l'épaisseur des couches dérivées des mesures SMP (5 cm à 1 cm). Cela suggère que le signal serait sensible à la microstructure à une échelle plus fine que celle des mesures traditionnelles (à 5 ou 3 cm). Les résultats montrent aussi qu'il est nécessaire d'ajuster la taille des grains de neige par un facteur correctif (noté  $\Phi$ ) pour minimiser l'erreur entre les  $T_B$  simulées et mesurées. Il a été démontré par ailleurs que ce facteur  $\Phi$  compense un problème de microstructure (cohésion, dispersité des grains) non pris en compte dans les mesures de taille des grains et densité. Ce facteur  $\Phi$  de l'ordre de 2.1 lorsque l'on considère en entrée le SMP est plus faible que si on considère des mesures de SSA traditionnelle (par réflectométrie infra-rouge). Cela voudrait dire que le SMP apporte une contribution supplémentaire à la prise en compte de la microstructure de la neige pour les micro-ondes. Ces résultats sur l'utilisation du SMP ont une portée pratique très importante, en démontrant que les données SMP, très rapide d'acquisition, pourraient remplacer les mesures traditionnelles de densité et taille des grains dans une fausse à neige (snowpits), parfois fastidieuses et longues à réaliser.

Cette première partie a considérée l'analyse du manteau neigeux dans son ensemble, qui intègre des variations verticales de structure, parfois importantes, par exemple avec des petits grains de surface peu dense et du givre de profondeur, gros grains pouvant atteindre 4 à 6 mm de longueur, dans le fond du manteau. L'analyse des processus de diffusion par couche homogène est une approche intéressante qui permet d'éviter ce problème d'intégration sur plusieurs couches.

L'analyse par couche a fait l'objet de la deuxième partie de cette étude. Un protocole expérimental a été mis au point pour réaliser l'analyse des propriétés radiométriques de couches homogènes de neige

extraites du manteaux neigeux, et pour permettre l'inversion de plusieurs paramètres : la « longueur de corrélation radiométrique » effective inversée, notée  $L_{eff}$  et les coefficients de diffusion et d'absorption de la neige  $\gamma_{diff}$  et  $\gamma_{abs}$ . Nous avons montré que la longueur de corrélation radiométrique ou effective doit être pondérée par un facteur de l'ordre de 1.2 – 1.3 par rapport à la relation théorique de Debye, pour minimiser l'erreur entre simulations et mesures. Ce résultat est discuté par rapport aux relations établies à partir de mesures de structure de la neige réalisées par micro-tomographie (expérience réalisée par l'équipe du Centre d'avalanche de Davos). Ce facteur aussi lié au problème de paramétrisation de la microstructure de la neige dépend du type de grain et reste énigmatique. Il n'est pas exclu que ce facteur résulte de problèmes de mesures ou d'inversion, bien qu'il ait été confirmé par d'autres expériences réalisées au sein de notre équipe. Il serait intéressant de vérifier nos résultats avec des mesures de SMP pour chaque couche, et d'analyser la capacité de dériver un indice microstructurel capable de discriminer le paramètre de cohésion à partir des données brutes du SMP.

La deuxième analyse sur les couches a porté sur l'inversion des coefficients de diffusion et d'absorption de la neige en utilisant un modèle simplifié à 6-flux sur un système d'équations exploitant deux mesures des couches : une posée sur un absorbeur (corps noirs de température connue) et l'autre sur une plaque parfaitement réfléchissante. Cette expérience s'est avérée difficile à analyser car assez bruitée par les incertitudes expérimentales. Cependant, elle a permis de discuter des variations observées en fonction de la taille des grains, de la densité et de la longueur de corrélation. Nos résultats ont été comparés à la théorie de diffusion de Rayleigh montrant des coefficients beaucoup plus faibles que ceux attendus. Nos résultats ne sont aussi pas en accord avec une autre inversion réalisé avec le modèle DMRT-ML. Il resterait un travail plus approfondi à réaliser à partir d'un protocole expérimental amélioré et moins bruité. On suggère par exemple l'utilisation de couches plus épaisses, des mesures radiométriques avec un angle d'incidence moins prononcé, et en prenant soin de ne pas contaminer la mesure avec des radiations de l'environnement. Cette étude permet d'augmenter la compréhension de l'émission micro-onde de la neige et constitue une étape importante vers le développement de modèles de surface capables de mieux modéliser les conditions de surface enneigée pendant l'hiver, ce qui pourrait constituer un outil important pour le suivi des effets des changements climatiques au Canada.

Je voudrais souligner que, durant, mon travail de maîtrise, j'ai aussi contribué aux recherches qui ont fait l'objet des deux publications suivantes :

- A. Roy, A. Royer, O. St-Jean-Rondeau, B. Montpetit, G. Picard, A. Mavrovic, N. Marchand, and A. Langlois. Microwave snow emission modeling uncertainties in boreal and subarctic environments,

The Cryosphere, 10, 623-638, 2016, doi:10.5194/tc-10-623-2016, 2016.[48]

- A. Royer, A. Roy, B. Montpetit, O. Saint-Jean-Rondeau, G. Picard, L. Brucker and A. Langlois. Comparison of commonly-used microwave radiative transfer models for snow remote sensing. Remote Sensing of Environment, 190 :247–259, 2017.[49]

Ma contribution a porté sur les simulations numériques réalisées avec la modélisation du transfert radiatif avec DMRT-ML et sur l'analyse de l'ensemble des résultats de ces deux articles.

## Références

- [1] AMAP. Snow, water, ice and permafrost in the arctic (swipa) :269 p. 2017.
- [2] K. W. Asmus et C. Grant. Surface based radiometer (sbr) data acquisition system. *International Journal of Remote Sensing*, 20(15-16) :3125-3129, 1999.
- [3] F. Becker. *Observation de la terre par télédétection : Fondements physiques, méthodologiques et technologiques*, numéro vol. 1 in *Observation de la terre par télédétection : Fondements physiques, méthodologiques et technologiques*. International Book Market Service Limited, 2011. isbn : 9786131565090.
- [4] R. D. Brown. Northern hemisphere snow cover variability and change, 1915–97. *Journal of Climate*, 13(13) :2339-2355, 2000.
- [5] L. Brucker, E. P. Dinnat, G. Picard et N. Champollion. Effect of snow surface metamorphism on aquarius I-band radiometer observations at dome c, antarctica. *IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing*, 52(11) :7408-7417, 2014.
- [6] L. Brucker, G. Picard, L. Arnaud, J.-M. Barnola, M. Schneebeli, H. Brunjail, E. Lefebvre et M. Fily. Modeling time series of microwave brightness temperature at dome c, antarctica, using vertically resolved snow temperature and microstructure measurements. *Journal of Glaciology*, 57(201) :171-182, 2011.
- [7] L. Brucker, G. Picard et M. Fily. Snow grain-size profiles deduced from microwave snow emissivities in antarctica. *Journal of Glaciology*, 56(197) :514-526, 2010.
- [8] A. Chang, J. Foster, D. Hall, A. RANGO et B. Hartline. Snow water equivalent determination by microwave radiometry. *Cold Regions Science and Technology*, 5 :259-267, mar. 1982.
- [9] W. Chang, K.-H. Ding, L. Tsang et X. Xu. Microwave scattering and medium characterization for terrestrial snow with qca–mie and bicontinuous models : comparison studies. *IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing*, 54(6) :3637-3648, 2016.
- [10] W. Chang, S. Tan, J. Lemmetyinen, L. Tsang, X. Xu et S. H. Yueh. Dense media radiative transfer applied to snowscat and snowsar. *IEEE Journal of Selected Topics in Applied Earth Observations and Remote Sensing*, 7(9) :3811-3825, 2014.
- [11] W. Chang et L. Tsang. A partial coherent physical model of third and fourth stokes parameters of sastrugi snow surfaces over layered media with rough surface boundary conditions of conical scattering combined with vector radiative transfer theory. *Progress In Electromagnetics Research*, 45 :57-82, 2012.

- [12] B. J. Choudhury et P. Pampaloni. *Passive Microwave Remote Sensing of Land–Atmosphere Interactions*. Vsp, 1995.
- [13] C. Derksen, A. Walker et B. Goodison. A comparison of 18 winter seasons of in situ and passive microwave-derived snow water equivalent estimates in western canada. *Remote Sensing of Environment*, 88(3) :271-282, 2003.
- [14] C. Derksen et R. Brown. Spring snow cover extent reductions in the 2008–2012 period exceeding climate model projections. *Geophysical Research Letters*, 39(19), 2012.
- [15] F. Domine, M. Albert, T. Huthwelker, H.-W. Jacobi, A. Kokhanovsky, M. Lehning, G. Picard et W. Simpson. Snow physics as relevant to snow photochemistry. *Atmospheric chemistry and physics*, 8(2) :171-208, 2008.
- [16] F. Dupont, G. Picard, A. Royer, M. Fily, A. Roy, A. Langlois et N. Champollion. Modeling the microwave emission of bubbly ice : applications to blue ice and superimposed ice in the antarctic and arctic. *IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing*, 52(10) :6639-6651, 2014.
- [17] C. Fierz, R. L. Armstrong, Y. Durand, P. Etchevers, E. Greene, D. M. McClung, K. Nishimura, P. K. Satyawali et S. A. Sokratov. *The international classification for seasonal snow on the ground*, tome 25. UNESCO/IHP Paris, 2009.
- [18] M. G. Flanner et C. S. Zender. Linking snowpack microphysics and albedo evolution. *Journal of Geophysical Research : Atmospheres*, 111(D12), 2006.
- [19] R. E. Kelly, A. T. Chang, L. Tsang et J. L. Foster. A prototype amsr-e global snow area and snow depth algorithm. *IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing*, 41(2) :230-242, 2003.
- [20] A. A. Kokhanovsky et E. P. Zege. Scattering optics of snow. *Applied Optics*, 43(7) :1589-1602, 2004.
- [21] Q. Krol et H. Löwe. Relating optical and microwave grain metrics of snow : the relevance of grain shape. *The Cryosphere*, 10(6) :2847, 2016.
- [22] F. Larue, A. Royer, D. De Sève, A. Langlois, A. Roy et L. Brucker. Validation of globsnow-2 snow water equivalent over eastern canada. *Remote Sensing of Environment*, 194 :264-277, 2017.
- [23] J. Lemmetyinen, J. Pulliainen, A. Rees, A. Kontu, Y. Qiu et C. Derksen. Multiple-layer adaptation of hut snow emission model : comparison with experimental data. *IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing*, 48(7) :2781-2794, 2010.
- [24] H. Löwe et A. van Herwijnen. A poisson shot noise model for micro-penetration of snow. *Cold Regions Science and Technology*, 70 :62-70, 2012. issn : 0165-232X.



- [25] H. Löwe et G. Picard. Microwave scattering coefficient of snow in memls and dmrt-ml revisited : the relevance of sticky hard spheres and tomography-based estimates of stickiness. *The Cryosphere*, 9(6) :2101-2117, 2015.
- [26] W. Maslanka, L. Leppänen, A. Kontu, M. Sandells, J. Lemmetyinen, M. Schneebeli, M. Proksch, M. Matzl, H.-R. Hannula et R. Gurney. Arctic snow microstructure experiment for the development of snow emission modelling. *Geoscientific Instrumentation, Methods and Data Systems*, 5(1) :85-94, 2016.
- [27] C. Mätzler. Passive microwave signatures of landscapes in winter. *Meteorology and Atmospheric Physics*, 54(1) :241-260, 1994.
- [28] C. Mätzler. Applications of the interaction of microwaves with the natural snow cover. *Remote Sensing Rreviews*, 2(2) :259-387, 1987.
- [29] C. Mätzler. Improved born approximation for scattering of radiation in a granular medium. *Journal of Applied Physics*, 83(11) :6111-6117, 1998.
- [30] C. Mätzler. Relation between grain-size and correlation length of snow. *Journal of Glaciology*, 48(162) :461-466, 2002.
- [31] C. Mätzler. *Thermal microwave radiation : applications for remote sensing*, tome 52. let, 2006.
- [32] C. Matzler et P. W. Rosenkranz. Dependence of microwave brightness temperature on bistatic surface scattering : model functions and application to amsu-a. *IEEE transactions on geoscience and remote sensing*, 45(7) :2130-2138, 2007.
- [33] F. Mesinger, G. DiMego, E. Kalnay, K. Mitchell, P. C. Shafran, W. Ebisuzaki, D. Jović, J. Woollen, E. Rogers, E. H. Berbery et al. North american regional reanalysis. *Bulletin of the American Meteorological Society*, 87(3) :343-360, 2006.
- [34] B. Montpetit, A. Royer, A. Langlois, P. Cliche, A. Roy, N. Champollion, G. Picard, F. Domine et R. Obbard. New shortwave infrared albedo measurements for snow specific surface area retrieval. *Journal of Glaciology*, 58(211) :941-952, 2012.
- [35] B. Montpetit, A. Royer, A. Roy et A. Langlois. In-situ passive microwave emission model parameterization of sub-arctic frozen organic soils. *Remote Sensing of Environment*, 205 :112-118, 2018.
- [36] B. Montpetit, A. Royer, A. Roy, A. Langlois et C. Derksen. Snow microwave emission modeling of ice lenses within a snowpack using the microwave emission model for layered snowpacks. *IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing*, 51(9) :4705-4717, 2013.

- [37] G. Picard, L. Brucker, A. Roy, F. Dupont, M. Fily et A. Royer. Simulation of the microwave emission of multi-layered snowpacks using the dense media radiative transfer theory : the dmrt-ml model. *Geosci. Model Dev. Discuss*, 5 :3647-3694, 2012.
- [38] G. Picard, L. Brucker, A. Roy, F. Dupont, M. Fily, A. Royer et C. Harlow. Simulation of the microwave emission of multi-layered snowpacks using the dense media radiative transfer theory : the dmrt-ml model. *Geosci. Model Dev.* :1061-1078, 2013.
- [39] G. Picard, M. Sandells et H. Löwe. Smrt : an active/passive microwave radiative transfer model for snow with multiple microstructure and scattering formulations (v1. 0). *Geosci. Model Dev. Discuss.*, <https://doi.org/10.5194/gmd-2017-314>, 2018.
- [40] C. Pielmeier et H.-P. Marshall. Rutschblock-scale snowpack stability derived from multiple quality-controlled snowmicropen measurements. *Cold Regions Science and Technology*, 59(2–3) :178-184, 2009. issn : 0165-232X.
- [41] M. Proksch, C. Mätzler, A. Wiesmann, J. Lemmetyinen, M. Schwank, H. Löwe et M. Schneebeli. Memls3&a : microwave emission model of layered snowpacks adapted to include backscattering. *Geoscientific Model Development*, 8(8) :2611-2626, 2015.
- [42] M. Proksch, H. Löwe et M. Schneebeli. Density, specific surface area, and correlation length of snow measured by high-resolution penetrometry. *Journal of Geophysical Research : Earth Surface*, 120(2) :346-362, 2015. issn : 2169-9011. doi : [10.1002/2014JF003266](https://doi.org/10.1002/2014JF003266). 2014JF003266.
- [43] M. Proksch, H. Löwe et M. Schneebeli. Density, specific surface area, and correlation length of snow measured by high-resolution penetrometry. *Journal of Geophysical Research : Earth Surface*, 120(2) :346-362, 2015.
- [44] J. T. Pulliainen, J. Grandell et M. T. Hallikainen. Hut snow emission model and its applicability to snow water equivalent retrieval. *IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing*, 37(3) :1378-1390, 1999.
- [45] W. Rees. *Physical Principles of Remote Sensing*, numéro 3rd edition. Cambridge University Press, 2012, 492 p. isbn : 9780521669481.
- [46] A. Roy. Modélisation de l'émission micro-onde hivernale en forêt boréale canadienne. *Thèse de doctorat, Université de Sherbrooke*, 2013.
- [47] A. Roy, G. Picard, A. Royer, B. Montpetit, F. Dupont, A. Langlois, C. Derksen et N. Champollion. Brightness temperature simulations of the canadian seasonal snowpack driven by measurements of the snow specific surface area. *IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing*, 51(9) :4692-4704, 2013.

- [48] A. Roy, A. Royer, O. St-Jean-Rondeau, B. Montpetit, G. Picard, A. Mavrovic, N. Marchand et A. Langlois. Microwave snow emission modeling uncertainties in boreal and subarctic environments. *The Cryosphere*, 10(2) :623-638, 2016.
- [49] A. Royer, A. Roy, B. Montpetit, O. Saint-Jean-Rondeau, G. Picard, L. Brucker et A. Langlois. Comparison of commonly-used microwave radiative transfer models for snow remote sensing. *Remote Sensing of Environment*, 190 :247-259, 2017.
- [50] N. Rutter, M. Sandells, C. Derksen, P. Toose, A. Royer, B. Montpetit, A. Langlois, J. Lemmetyinen et J. Pulliainen. Snow stratigraphic heterogeneity within ground-based passive microwave radiometer footprints : implications for emission modeling. *Journal of Geophysical Research : Earth Surface*, 119(3) :550-565, 2014.
- [51] M. Sandells, H. Löwe, G. Picard, M. Dumont, R. Essery, N. Floury, A. Kontu, J. Lemmetyinen, W. Maslanka, C. Mätzler et al. The asmex snow slab experiment : snow microwave radiative transfer (smrt) model evaluation. In *EGU General Assembly Conference Abstracts*, tome 19, page 18295, 2017.
- [52] M. Schneebeli et J. B. Johnson. A constant-speed penetrometer for high-resolution snow stratigraphy. *Annals of Glaciology*, 26 :107-111, 1998.
- [53] M. Schneebeli, C. Pielmeier et J. B. Johnson. Measuring snow microstructure and hardness using a high resolution penetrometer. *Cold Regions Science and Technology*, 30(1) :101-114, 1999.
- [54] S.-E. Shih, K.-H. Ding, J. Kong, Y. Yang, R. Davis, J. Hardy et R. Jordan. Modeling of millimeter wave backscatter of time-varying snowcover. *Progress In Electromagnetics Research*, 16 :305-330, 1997.
- [55] S. Tan, W. Chang, L. Tsang, J. Lemmetyinen et M. Proksch. Modeling both active and passive microwave remote sensing of snow using dense media radiative transfer (dmrt) theory with multiple scattering and backscattering enhancement. *IEEE Journal of Selected Topics in Applied Earth Observations and Remote Sensing*, 8(9) :4418-4430, 2015.
- [56] A. M. Toure, K. Goïta, A. Royer, C. Mätzler et M. Schneebeli. Near-infrared digital photography to estimate snow correlation length for microwave emission modeling. *Applied optics*, 47(36) :6723-6733, 2008.
- [57] L. Tsang, C.-T. Chen, A. T. Chang, J. Guo et K.-H. Ding. Dense media radiative transfer theory based on quasicrystalline approximation with applications to passive microwave remote sensing of snow. *Radio Science*, 35(3) :731-749, 2000.
- [58] L. Tsang, K.-H. Ding, S. Huang et X. Xu. Electromagnetic computation in scattering of electromagnetic waves by random rough surface and dense media in microwave remote sensing of land surfaces. *Proceedings of the IEEE*, 101(2) :255-279, 2013.
- [59] L. Tsang, J. A. Kong et R. T. Shin. Theory of microwave remote sensing, 1985.

- [60] A. Wiesmann et C. Mätzler. Microwave emission model of layered snowpacks. *Remote Sensing of Environment*, 70(3) :307-316, 1999.
- [61] A. Wiesmann, C. Mätzler et T. Weise. Radiometric and structural measurements of snow samples. *Radio Science*, 33(2) :273-289, 1998.

## 6 Annexe

### 6.1 Tableaux et figures relatives aux données utilisées

Tableau 10 – Données de la Campagne Janvier BJ2015

Nom du Snowpit	Épaisseur (cm)	Température (K)	Densité Moyenne ( $\text{kgm}^{-3}$ )	$R_{OPT}$ Moyen ( $\mu\text{m}$ )	Tsol (K)	Croûtes	SMP
BJ_jan2015_SP1	67.5	257.5	279	131	273.6		
BJ_jan2015_SP2	59.5	261.3	247	166	273		x
BJ_jan2015_SP3	53	259.5	242	187	272		x
BJ_jan2015_SP4	93.5	262.6	285	149	274.7		x
BJ_jan2015_SP5	113	262.5	309	140	273.8		x
BJ_jan2015_SP6	52	258.7	314	165	269.8		
BJ_jan2015_SP7	54	257.8	235	185	271.2		
BJ_jan2015_SP8	93	258.6	267	141	273.1		x
BJ_jan2015_SP9	44	257.1	226	164	271.0		x
BJ_jan2015_SP10	50	259.8	248	166	269.8		x
BJ_jan2015_SP11	22	257.1	234	135	264.1		x

Tableau 11 – Données de la Campagne Février BJ2015

Nom du Snowpit	Épaisseur (cm)	Température (K)	Densité Moyenne ( $\text{kgm}^{-3}$ )	$R_{OPT}$ Moyen ( $\mu\text{m}$ )	Tsol (K)	Croûtes	SMP
BJ_feb2015_SP1	109	260.1	296	202	271.2		x
BJ_feb2015_SP2	118	259.4	322	203	271.8		x
BJ_feb2015_SP3	98	259.6	283	254	270.2		x
BJ_feb2015_SP4	60	258.1	231	216	270.0		x
BJ_feb2015_SP5	62	260.2	218	198	271.0		x
BJ_feb2015_SP6	69	260.8	232	206	270.0		x
BJ_feb2015_SP7	68	261.2	279	218	270.7		x
BJ_feb2015_SP8	63	261.1	307	259	270.1		x
BJ_feb2015_SP9	103	260.1	310	228	273		x
BJ_feb2015_SP10	84	261.2	264	223	272.6		x
BJ_feb2015_SP11	87	261.0	246	243	272.7		x
BJ_feb2015_SP12	97	260.7	283	240	272.8		x

Tableau 12 – Snowpits des campagnes de 2016

Nom du Snowpit	Épaisseur (cm)	Température (K)	Densité Moyenne ( $\text{kgm}^{-3}$ )	$R_{OPT}$ Moyen ( $\mu\text{m}$ )	Tsol (K)	Croûtes	SMP
MOREX1 SP1	42	266.7	307	199	273.2		X
MOREX1 SP2	44	267.5	280	163	272.8		
MOREX1 SP3	50	265.9	265	215	271.8		
MOREX2 SP1	72	266.0	271	192	270.5		
MOREX2 SP2	69	261.0	280	239	268.5		
MOREX3 SP1	131	269.1	293	269	272.8	X	X
MOREX3 SP2	132	268.8	298	297	273.0	X	X
Umiujaq SP1	63	256.9	333	181	265.5		
Umiujaq SP2	98	258.7	353	147	267.8		
Umiujaq SP3	108	266.9	273	223	271.9		
Umiujaq SP4	143	263.4	336	168	272.1		
Umiujaq SP5	161	264.0	298	190	272.8		
Umiujaq SP6	105	259.7	373	198	268.5		

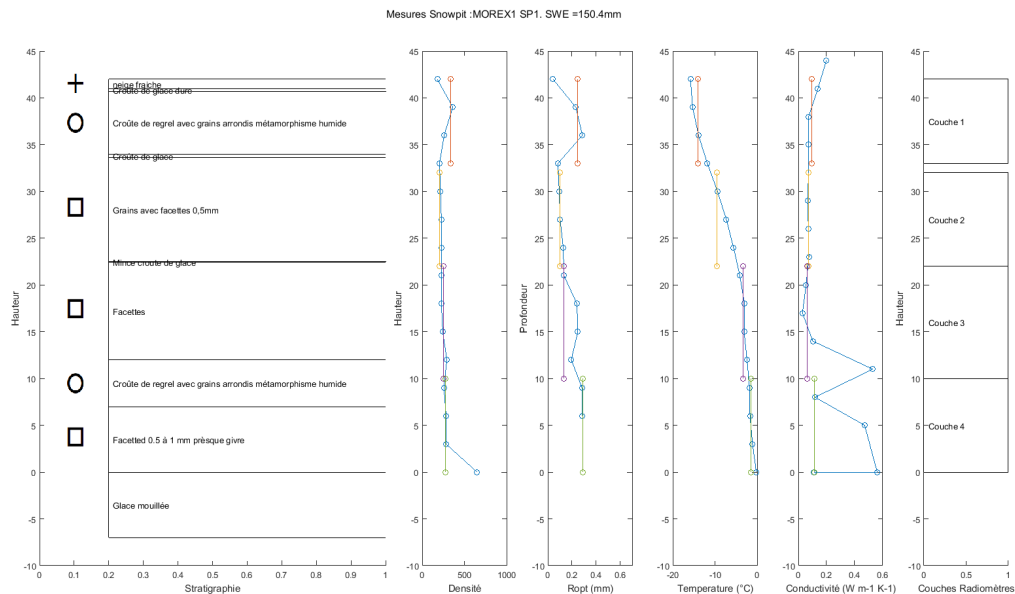


Figure 24 – Bilan du snowpit du site Morex1-SP1.

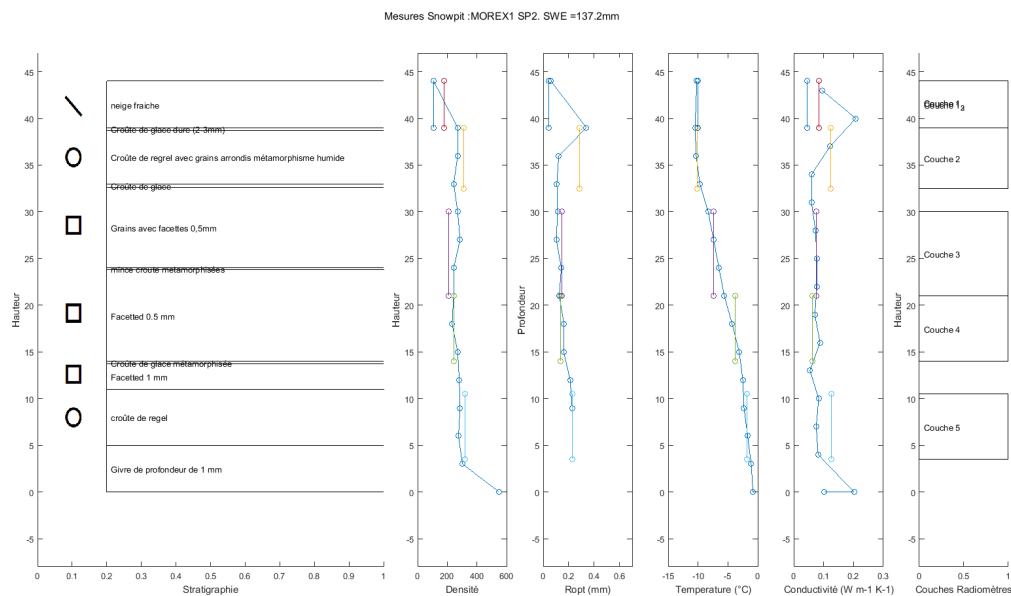


Figure 25 – Bilan du snowpit du site Morex1-SP2.

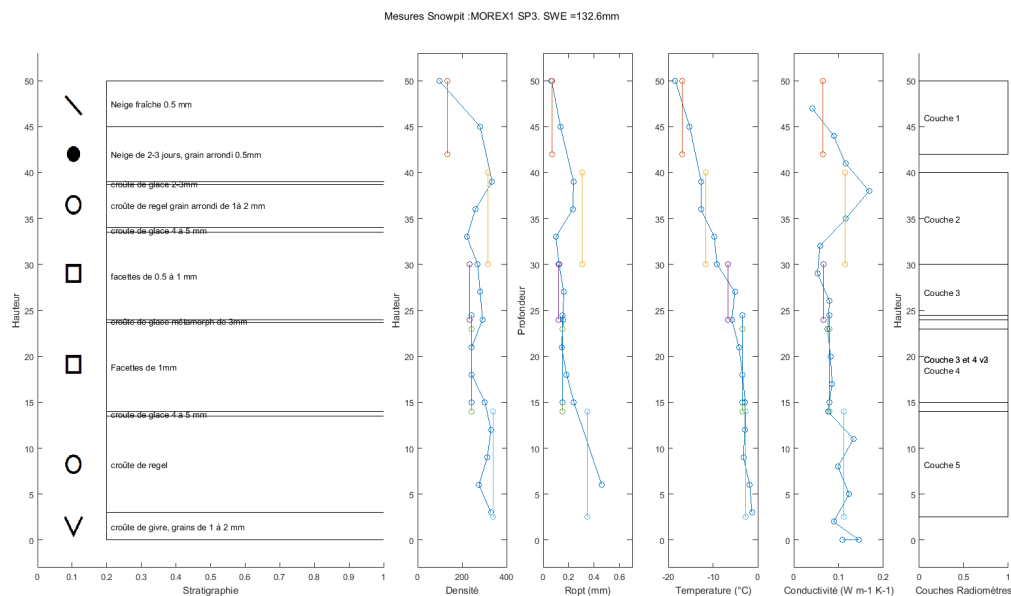


Figure 26 – Bilan du snowpit du site Morex1-SP3.

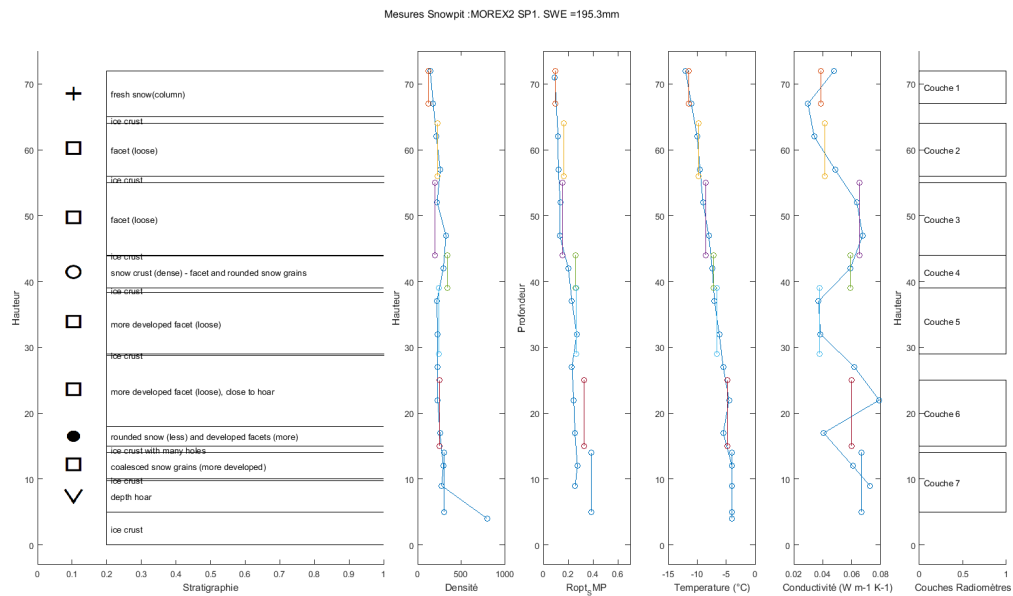


Figure 27 – Bilan du snowpit du site Morex2-SP1.

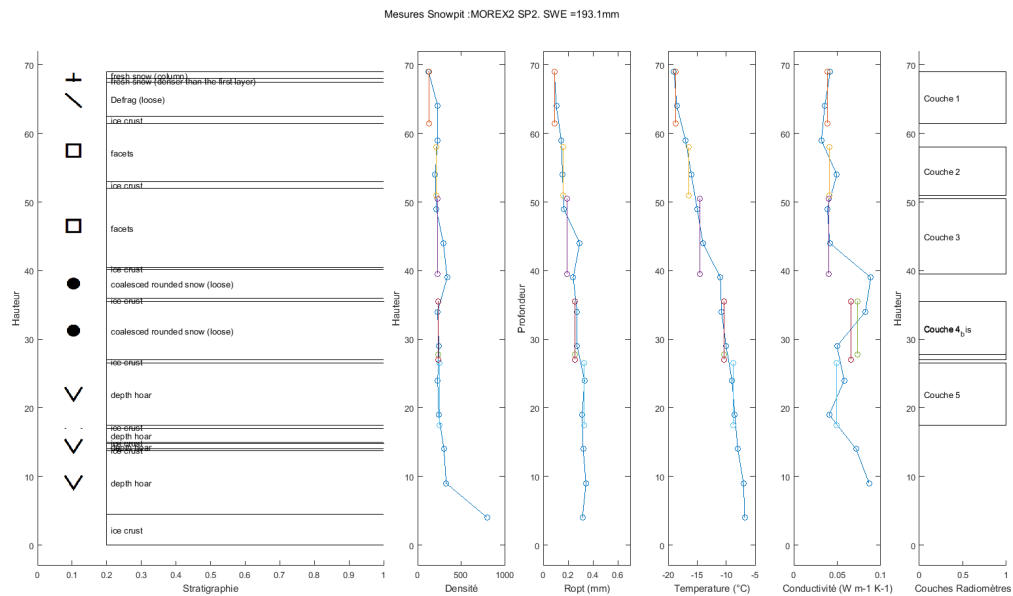


Figure 28 – Bilan du snowpit du site Morex2-SP2.



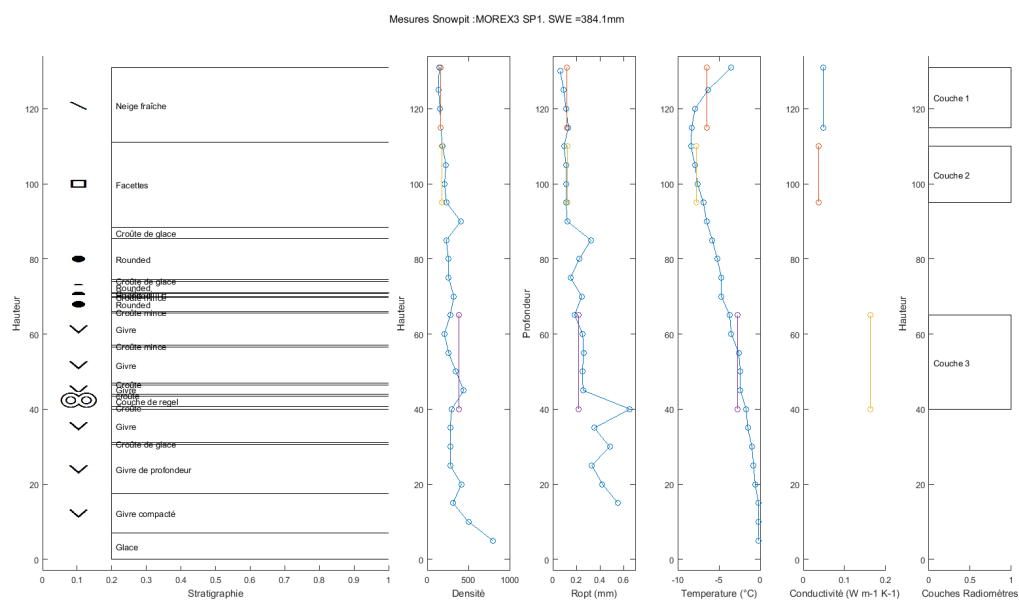


Figure 29 – Bilan du snowpit du site Morex3-SP1.

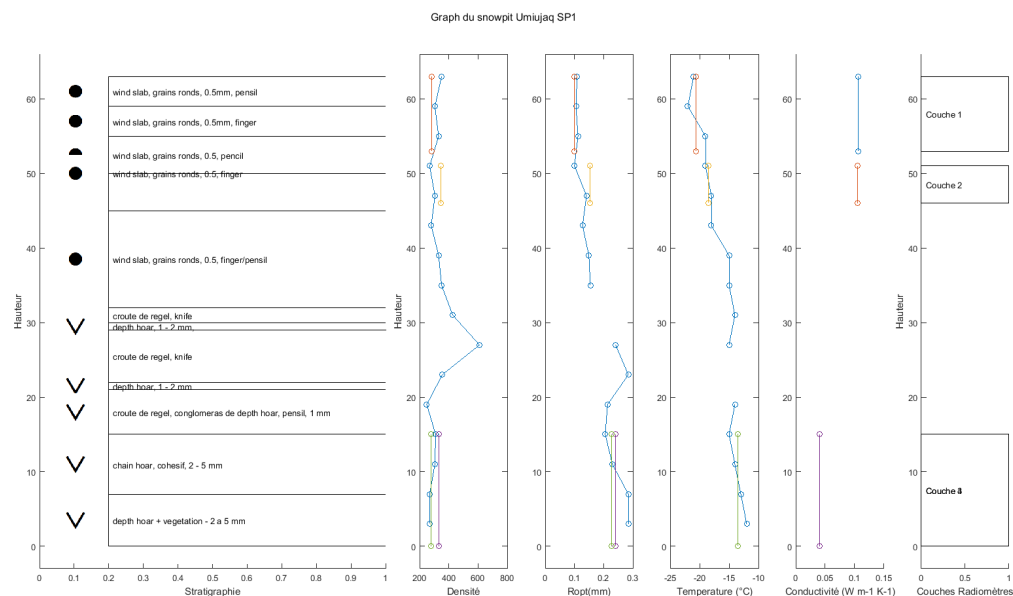


Figure 30 – Bilan du snowpit du site UMI-SP1.

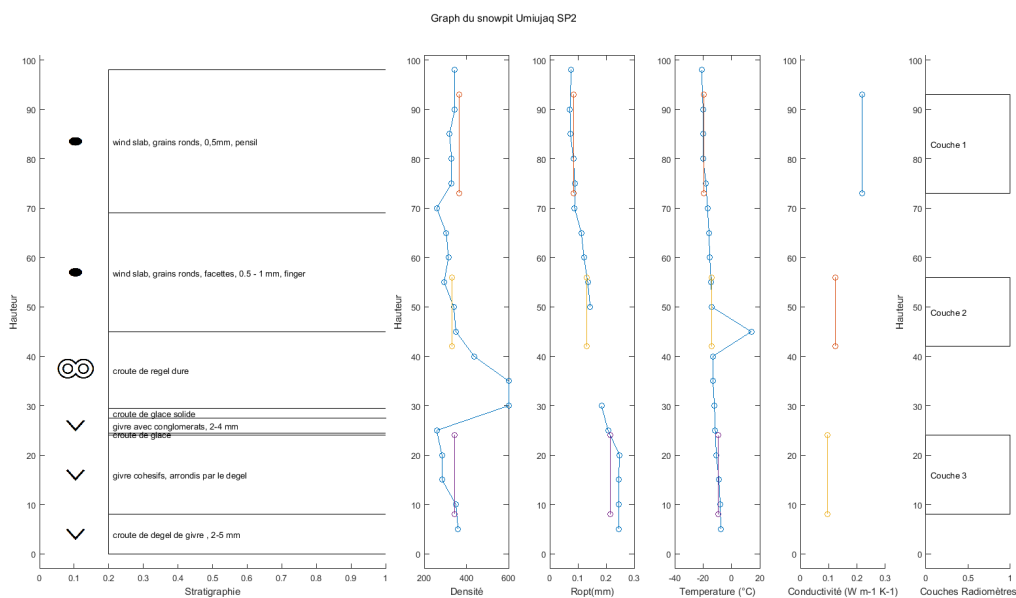


Figure 31 – Bilan du snowpit du site UMI-SP2.

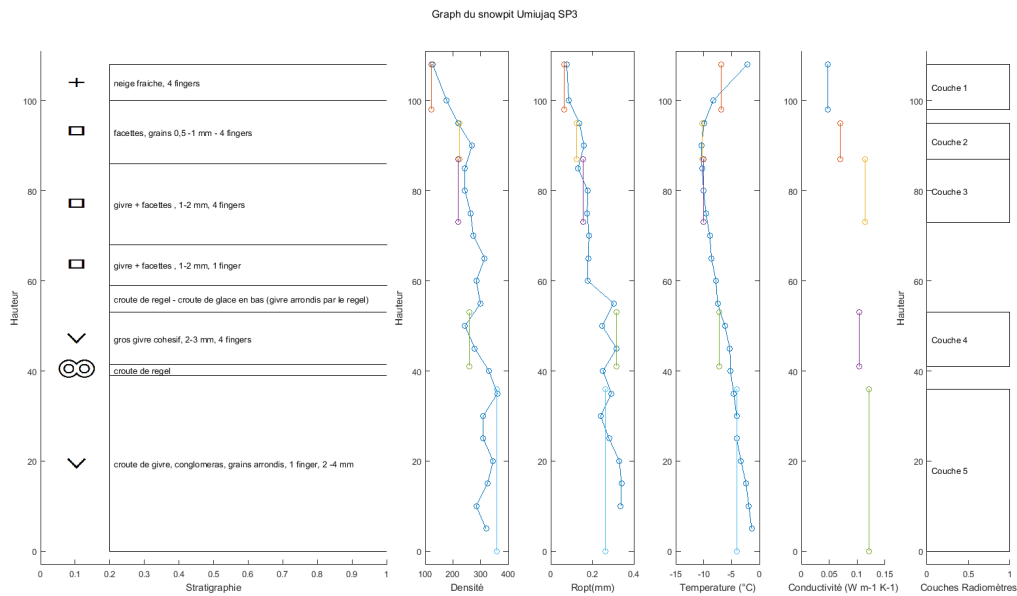


Figure 32 – Bilan du snowpit du site UMI-SP3.

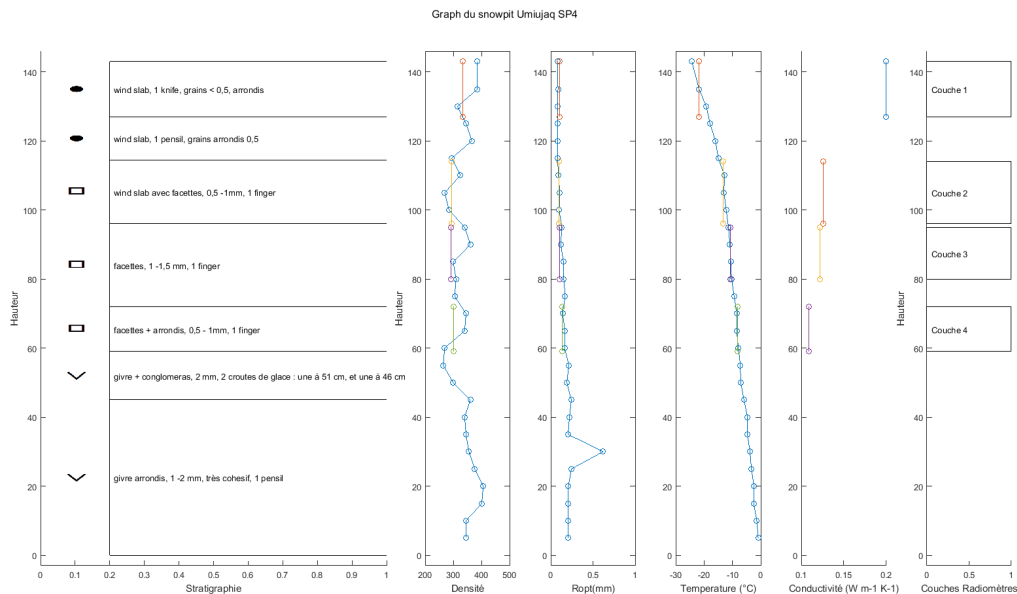


Figure 33 – Bilan du snowpit du site UMI-SP4.

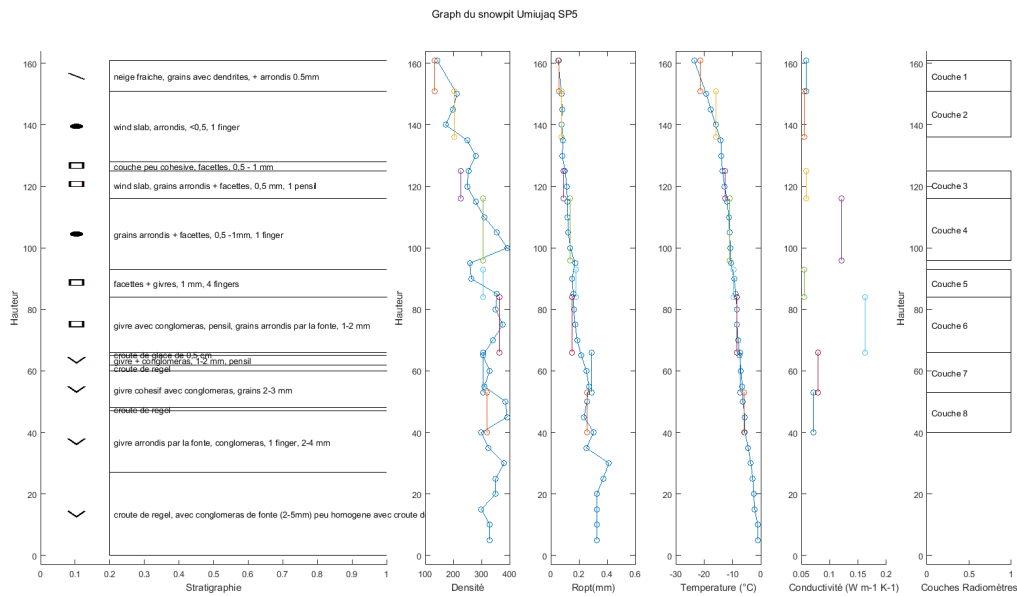


Figure 34 – Bilan du snowpit du site UMI-SP5.

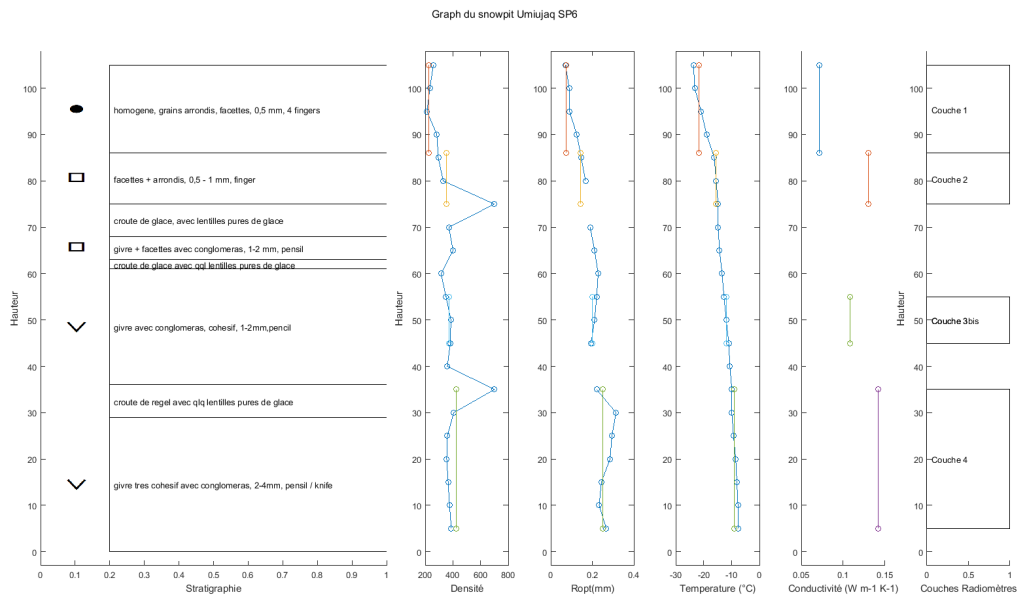


Figure 35 – Bilan du snowpit du site UMI-SP6.

Tableau 13 – Caractéristiques des couches : Tableau 1

Site	Nom Snowpit	Nom couche	Tsnow (K)	Tab (K)	Densité (kg/m <sup>3</sup> )	Ropt (mm)	Epaisseur (cm)	SWE (mm)	Conductivité (W m-1K-1)	RVisuel (mm)	Type Grain	Homo	Craqué	Parf
Montmorency	MOREX_SP1	Couche 1	259.1	260.4	336.9	0.249	9.0	30.3	0.095	2	MF	0	0	0
Montmorency	MOREX_SP1	Couche 2	263.7	260.4	207.2	0.098	10.0	20.7	0.071	0.5	FC	1	0	1
Montmorency	MOREX_SP1	Couche 3	269.8	260.4	255.4	0.131	12.0	30.6	0.062	1	FC	1	0	1
Montmorency	MOREX_SP1	Couche 4	271.6	260.4	272.1	0.289	10.0	27.2	0.114	2	MF	0	1	0
Montmorency	MOREX_SP2	Couche 1	263.1	263.6	108.1	0.042	5.0	5.4	0.045	1.5	PP	1	0	1
Montmorency	MOREX_SP2	Couche 2	263.0	263.8	312.6	0.288	7.0	21.9	0.125	2	MF	0	0	0
Montmorency	MOREX_SP2,	Couche 3	265.8	264.5	209.0	0.145	9.0	18.8	0.076	0.5	FC	0	0	0
Montmorency	MOREX_SP2	Couche 4	269.4	263.9	245.0	0.137	7.0	17.2	0.062	0.5	FC	1	1	0
Montmorency	MOREX_SP2	Couche 5	271.3	263.5	320.7	0.229	7.0	22.5	0.126	1	MF	0	1	0
Montmorency	MOREX_SP2	Couche 1_2	263.1	264.3	180.2	0.042	5.0	9.0	0.085	1.5	PP	1	0	1
Montmorency	MOREX_SP2	Couche 1_3	263.1	263.1	109.9	0.044	14.0	15.4	0.045	1.5	PP	1	0	1
Montmorency	MOREX_SP3	Couche 1	256.4	257.0	132.4	0.068	8.0	10.6	0.065	0.5	PP	1	0	1
Montmorency	MOREX_SP3	Couche 2	261.5	257.2	315.7	0.309	10.0	31.6	0.114	1.5	MF	0	0	0
Montmorency	MOREX_SP3	Couche 3	266.5	257.6	234.6	0.122	6.0	14.1	0.066	1	FC	1	1	0
Montmorency	MOREX_SP3	Couche 4	269.7	258.5	243.2	0.152	9.0	21.9	0.080	1	FC	1	0	1
Montmorency	MOREX_SP3	Couche 5	270.5	258.5	338.7	0.349	11.5	39.0	0.111	1.5	MF	0	0	0
Montmorency	MOREX_SP3	Couche 3 et 4 v2	269.7	261.7	243.2	0.152	9.5	23.1	0.080	1	FC	0	0	0
Montmorency	MOREX_SP3	Couche 3 et 4 v3	269.7	260.7	243.2	0.152	8.5	20.7	0.080	1	FC	1	0	1
Montmorency	MOREX2_SP1	Couche 1	261.7	261.2	121.7	0.098	4.5	5.5	0.039	0.5	PP	1	1	0
Montmorency	MOREX2_SP1	Couche 2	263.4	261.2	226.5	0.167	6.3	14.3	0.041	1	FC	0	1	0
Montmorency	MOREX2_SP1	Couche 3	264.7	258.2	200.0	0.154	10.5	21.1	0.066	1	FC	1	0	1
Montmorency	MOREX2_SP1	Couche 4	266.0	258.2	342.5	0.261	5.8	20.0	0.059	1.5	MF	0	1	0
Montmorency	MOREX2_SP1	Couche 5	266.6	258.2	241.3	0.265	7.7	18.5	0.038	2	FC	1	1	0
Montmorency	MOREX2_SP1	Couche 6	268.4	258.2	254.6	0.329	8.3	21.2	0.060	2	FC	1	1	0

Tableau 14 – Caractéristiques des couches : Tableau 2

Montmorency	MOREX2_SP1	Couche 7	269.2	258.2	305.0	0.389	9.5	29.0	0.067	3	FC	1	1	0
Montmorency	MOREX2_SP2	Couche 1	254.4	258.2	134.5	0.093	7.4	9.9	0.039	0.5	DF	1	0	1
Montmorency	MOREX2_SP2	Couche 2	256.7	258.2	215.2	0.162	6.1	13.2	0.041	1.5	FC	0	1	0
Montmorency	MOREX2_SP2	Couche 3	258.7	258.2	231.6	0.191	10.5	24.3	0.040	1.5	FC	1	1	0
Montmorency	MOREX2_SP2	Couche 4	262.8	259.2	238.1	0.256	10.7	25.5	0.074	2	RG	0	1	0
Montmorency	MOREX2_SP2	Couche 5	264.4	259.2	252.8	0.329	8.8	22.1	0.049	3	DH	1	0	1
Montmorency	MOREX2_SP2	Couche 4_bis	262.8	260.2	234.1	0.256	10.0	23.4	0.066	2	RG	1	0	1
Montmorency	MOREX3_SP1	Couche 1	266.7	270.6	162.0	0.118	15.6	25.2	0.048	0.5	DF	1	1	0
Montmorency	MOREX3_SP1	Couche 2	265.5	270.6	177.9	0.128	15.4	27.4	0.037	0.5	FC	1	1	0
Montmorency	MOREX3_SP1	Couche 3	270.4	270.6	383.9	0.218	10.1	38.9	0.162	2.5	DH	0	0	0
Montmorency	MOREX3_SP2	Couche 1	266.9	269.2	153.1	0.092	15.8	24.1	0.050	0.5	RG	1	1	0
Montmorency	MOREX3_SP2	Couche 1	266.9	270.2	182.4	0.122	14.4	26.3	0.086	0.5	RG	1	1	0
Montmorency	MOREX3_SP2	Couche 3	268.5	270.2	242.3	0.142	9.4	22.8	0.087	1	RG	1	1	0
Montmorency	MOREX3_SP2	Couche 4	269.7	271.2	338.0	0.209	8.8	29.6	0.125	2	FC	0	1	0
Montmorency	MOREX3_SP2	Couche 5	271.4	271.4	310.2	0.305	14.6	45.4	0.085	4	DH	1	0	1
Montmorency	MOREX3_SP2	Couche 6	272.0	271.9	299.4	0.397	14.4	43.1	0.063	4	DH	0	1	0
Umiujaq 2016	maison_sp1	Couche 1	255.0	259.2	250.0	0.065	14.0	35.0	0.112	0.25	RG	1	0	1
Umiujaq 2016	maison_sp1	Couche 2	257.5	259.2	256.0	0.067	10.6	27.2	0.117	0.5	RG	1	1	0
Umiujaq 2016	maison_sp1	Couche 3	257.8	259.2	281.0	0.071	15.4	43.2	0.130	0.75	RG	1	1	0
Umiujaq 2016	maison_sp1	Couche 4	258.4	259.2	300.9	0.076	14.0	42.0	0.124	0.25	RG	1	1	0
Umiujaq 2016	maison_sp1	Couche 5	255.2	259.2	358.0	0.099	15.5	55.4	0.198	1	RG	1	1	0
Umiujaq 2016	Tundra_SP1	Couche 1	252.5	255.2	284.4	0.099	10.2	28.9	0.106	0.5	RG	1	1	0
Umiujaq 2016	Tundra_SP1	Couche 2	254.7	255.7	344.1	0.154	5.4	18.4	0.105	1.5	RG	0	1	0
Umiujaq 2016	Tundra_SP1	Couche 3	259.7	256.2	333.9	0.240	9.0	30.1		4	DH	1	0	1
Umiujaq 2016	Tundra_SP1	Couche 4	259.7	256.7	276.8	0.226	12.6	34.9	0.040	4	DH	0	1	0
Umiujaq 2016	Tundra_SP2	Couche 1	253.7	258.2	366.9	0.085	16.4	60.1	0.217	0.5	RG	1	1	0

Tableau 15 – Caractéristiques des couches : Tableau 3

Umiujaq 2016	Tundra_SP2	Couche 2	259.1	258.2	331.4	0.131	14.6	48.4	0.124	0.5	RG	1	1	0
Umiujaq 2016	Tundra_SP2	Couche 3	264.0	258.2	344.1	0.216	11.0	37.8	0.096	4	DH	1	0	1
Umiujaq 2016	foret_sp3	Couche 1	266.4	270.2	121.9	0.064	11.7	14.2	0.048	2	PP	1	0	1
Umiujaq 2016	foret_sp3	Couche 2	263.0	270.7	223.1	0.126	6.9	15.4	0.069	1	FC	1	1	0
Umiujaq 2016	foret_sp3	Couche 3	263.2	271.2	219.6	0.156	14.0	30.7	0.115	2	FC	0	1	0
Umiujaq 2016	foret_sp3	Couche 4	266.0	271.2	260.3	0.317	10.9	28.3	0.104	3	DH	1	1	0
Umiujaq 2016	foret_sp3	Couche 5	269.1	271.0	358.7	0.263	11.4	40.9	0.121	4	DH	1	0	1
Umiujaq 2016	Arbustes_SP4	Couche 1	251.4	247.9	333.3	0.102	15.1	50.2	0.200	0.5	RG	1	1	0
Umiujaq 2016	Arbustes_SP4	Couche 2	259.9	247.9	293.3	0.099	11.3	33.1	0.125	0.75	RG	1	1	0
Umiujaq 2016	Arbustes_SP4	Couche 3	262.4	247.8	291.7	0.103	13.6	39.5	0.122	1	FC	1	0	1
Umiujaq 2016	Arbustes_SP4	Couche 4	264.9	248.5	302.2	0.135	15.7	47.3	0.109	1.5	FC	1	0	1
Umiujaq 2016	lac_SP4	Couche c1lac	249.2	248.7	364.4	0.083	15.2	55.4	0.180	0.5	RG	0	1	0
Umiujaq 2016	lac_SP4	Couche c2lac	249.2	249.0	344.1	0.163	10.9	37.5	0.080	2	DH	0	0	0
Umiujaq 2016	Foret_SP5	Couche 1	251.8	248.2	133.3	0.058	11.0	14.7	0.059	0.5	DF	1	1	0
Umiujaq 2016	Foret_SP5	Couche 2	257.3	248.2	204.4	0.074	15.8	32.2	0.055	0.5	RG	1	0	1
Umiujaq 2016	Foret_SP5	Couche 3	260.5	248.2	226.0	0.091	12.5	28.2	0.059	0.5	FC	1	1	0
Umiujaq 2016	Foret_SP5	Couche 4	262.3	248.2	306.0	0.137	10.0	30.4	0.121	1	RG	1	1	0
Umiujaq 2016	Foret_SP5	Couche 5	263.6	248.2	304.7	0.178	10.8	33.0	0.055	1	FC	1	1	0
Umiujaq 2016	Foret_SP5	Couche 6	264.8	248.2	364.4	0.151	14.7	53.6	0.162	1.5	FC	1	1	0
Umiujaq 2016	Foret_SP5	Couche 7	266.0	248.2	306.0	0.293	13.1	39.9	0.080	2.5	DH	0	1	0
Umiujaq 2016	Foret_SP5	Couche 8	267.2	248.2	318.7	0.257	14.7	46.7	0.071	2.5	DH	0	1	0
Umiujaq 2016	Tundra_SP6	Couche 1	251.5	249.2	226.6	0.075	16.4	37.2	0.071	0.5	RG	1	1	0
Umiujaq 2016	Tundra_SP6	Couche 2	257.7	249.2	352.3	0.144	10.1	35.6	0.130	1	FC	1	0	1
Umiujaq 2016	Tundra_SP6	Couche 3	261.3	249.2	372.0	0.201	14.6	54.3	0.108	1.5	DH	0	1	0
Umiujaq 2016	Tundra_SP6	Couche 4	264.0	249.2	425.3	0.251	8.3	35.3	0.142	3	DH	1	1	0
Umiujaq 2016	Tundra_SP6	Couche 3bis	261.3	249.2	370.1	0.199	11.0	40.6	0.108	1.5	DH	1	0	1

Tableau 16 – Propriétés radiométriques des couches pour la campagne Morex1

Échantillon	Fréquence (GHz)	T BM (K)		T BM, SKY (K)		T BA (K)		T BA, SKY (K)		T BSKY (K)		T Abs
		H	V	H	V	H	V	H	V	H	V	
MOREX_SP1_Couche 1	11	15.7	21.1	36.6	31.4	242.3	179.4	254.7	251.7	-7.9	-8.6	-12.8
	19	52.9	51.6	83.3	76.1	233.8	192.0	253.9	245.5	3.2	3.5	-12.8
	37	109.5	104.8	80.9	79.1	220.6	201.3	258.2	255.2	38.3	37.0	-12.8
	89	160.8	151.2	58.4	60.1	173.9	161.8	247.9	245.3	23.1	23.5	-12.8
MOREX_SP1_Couche 2	11	6.7	9.6	36.6	31.4	254.0	228.6	254.7	251.7	-7.9	-8.6	-12.8
	19	36.8	42.1	83.3	76.1	254.5	232.2	253.9	245.5	3.2	3.5	-12.8
	37	74.8	74.6	80.9	79.1	257.0	219.8	258.2	255.2	38.3	37.0	-12.8
	89	157.3	149.9	58.4	60.1	221.4	204.9	247.9	245.3	23.1	23.5	-12.8
MOREX_SP1_Couche 3	11	14.7	30.3	36.6	31.4	249.5	206.7	254.7	251.7	-7.9	-8.6	-12.8
	19	39.6	55.8	83.3	76.1	249.1	204.3	253.9	245.5	3.2	3.5	-12.8
	37	102.0	98.5	80.9	79.1	240.0	216.6	258.2	255.2	38.3	37.0	-12.8
	89	180.8	167.0	58.4	60.1	194.5	180.4	247.9	245.3	23.1	23.5	-12.8
MOREX_SP1_Couche 4	11	33.4	30.9	36.6	31.4	245.8	214.0	254.7	251.7	-7.9	-8.6	-12.8
	19	79.1	74.4	83.3	76.1	240.7	178.3	253.9	245.5	3.2	3.5	-12.8
	37	120.7	111.4	80.9	79.1	227.6	188.3	258.2	255.2	38.3	37.0	-12.8
	89	164.0	153.8	58.4	60.1	169.7	160.0	247.9	245.3	23.1	23.5	-12.8
MOREX_SP2_Couche 1	11	0.7	0.5	3.8	0.5	256.7	247.2	257.3	255.6	-11.5	-12.0	-9.6
	19	28.7	34.6	26.4	25.1	258.1	248.8	258.6	255.6	7.9	8.3	-9.6
	37	63.5	62.1	60.1	58.7	259.9	248.1	259.0	256.4	33.5	33.7	-9.6
	89	105.2	102.3	91.2	88.6	255.4	244.8	245.2	240.5	20.5	20.8	-9.6
MOREX_SP2_Couche 2	11	12.8	22.6	3.8	0.5	242.0	138.8	257.3	255.6	-11.5	-12.0	-9.4
	19	61.8	62.9	26.4	25.1	233.0	161.8	258.6	255.6	7.9	8.3	-9.4
	37	121.6	114.6	60.1	58.7	209.7	193.2	259.0	256.4	33.5	33.7	-9.4
	89	168.3	161.5	91.2	88.6	175.0	167.8	245.2	240.5	20.5	20.8	-9.4
MOREX_SP2_Couche 3	11	-1.0	-2.2	3.8	0.5	255.6	234.7	257.3	255.6	-11.5	-12.0	-8.7
	19	31.0	38.3	26.4	25.1	256.0	232.6	258.6	255.6	7.9	8.3	-8.7
	37	77.6	77.9	60.1	58.7	253.7	224.4	259.0	256.4	33.5	33.7	-8.7
	89	161.6	153.6	91.2	88.6	218.0	204.3	245.2	240.5	20.5	20.8	-8.7
MOREX_SP2_Couche 4	11	-0.5	1.8	3.8	0.5	254.6	233.9	257.3	255.6	-11.5	-12.0	-9.3
	19	31.8	37.7	26.4	25.1	257.0	234.7	258.6	255.6	7.9	8.3	-9.3
	37	79.2	79.6	60.1	58.7	257.4	236.4	259.0	256.4	33.5	33.7	-9.3
	89	164.7	154.0	91.2	88.6	211.4	201.6	245.2	240.5	20.5	20.8	-9.3
MOREX_SP2_Couche 5	11	5.2	13.0	3.8	0.5	248.1	210.4	257.3	255.6	-11.5	-12.0	-9.7
	19	49.4	57.3	26.4	25.1	240.4	188.6	258.6	255.6	7.9	8.3	-9.7
	37	121.5	112.6	60.1	58.7	219.0	192.0	259.0	256.4	33.5	33.7	-9.7
	89	162.8	157.1	91.2	88.6	169.3	164.2	245.2	240.5	20.5	20.8	-9.7
MOREX_SP2_Couche 1_2	11	0.5	-2.3	3.8	0.5	254.8	223.3	257.3	255.6	-11.5	-12.0	-8.9
	19	28.1	32.3	26.4	25.1	257.2	237.8	258.6	255.6	7.9	8.3	-8.9
	37	66.8	69.7	60.1	58.7	260.0	242.4	259.0	256.4	33.5	33.7	-8.9
	89	127.5	123.5	91.2	88.6	253.8	237.2	245.2	240.5	20.5	20.8	-8.9
MOREX_SP2_Couche 1_3	11	0.6	0.9	3.8	0.5	253.6	237.9	257.3	255.6	-11.5	-12.0	-10.1
	19	37.7	38.4	26.4	25.1	255.1	237.8	258.6	255.6	7.9	8.3	-10.1
	37	67.3	70.1	60.1	58.7	258.4	242.6	259.0	256.4	33.5	33.7	-10.1
	89	127.9	126.1	91.2	88.6	244.6	236.0	245.2	240.5	20.5	20.8	-10.1
MOREX_SP3_Couche 1	11	33.2	48.8	17.0	5.1	247.2	216.9	250.3	226.7	-16.3	-17.0	-16.2
	19	65.8	52.6	74.7	56.8	241.7	212.1	245.3	229.2	7.6	8.5	-16.2
	37	80.7	75.2	70.0	69.4	245.2	222.1	229.4	222.4	29.4	28.8	-16.2
	89	162.8	156.3	131.6	128.8	207.2	184.5	228.0	220.5	18.8	19.0	-16.2
MOREX_SP3_Couche 2	11	71.1	56.9	17.0	5.1	228.6	119.1	250.3	226.7	-16.3	-17.0	-16
	19	98.6	74.3	74.7	56.8	223.5	135.4	245.3	229.2	7.6	8.5	-16
	37	142.0	123.9	70.0	69.4	204.2	176.9	229.4	222.4	29.4	28.8	-16
	89	167.7	157.8	131.6	128.8	172.7	161.0	228.0	220.5	18.8	19.0	-16
MOREX_SP3_Couche 3	11	41.1	31.7	17.0	5.1	246.1	203.1	250.3	226.7	-16.3	-17.0	-15.6
	19	93.5	76.0	74.7	56.8	233.3	196.2	245.3	229.2	7.6	8.5	-15.6
	37	102.5	99.3	70.0	69.4	229.7	208.7	229.4	222.4	29.4	28.8	-15.6
	89	177.4	160.0	131.6	128.8	205.4	195.4	228.0	220.5	18.8	19.0	-15.6
MOREX_SP3_Couche 4	11	38.6	57.4	17.0	5.1	246.8	211.7	250.3	226.7	-16.3	-17.0	-14.7
	19	67.9	71.3	74.7	56.8	243.1	200.4	245.3	229.2	7.6	8.5	-14.7
	37	97.1	86.9	70.0	69.4	236.0	211.4	229.4	222.4	29.4	28.8	-14.7
	89	173.2	159.3	131.6	128.8	201.2	188.2	228.0	220.5	18.8	19.0	-14.7
MOREX_SP3_Couche 5	11	26.5	37.4	17.0	5.1	234.0	190.2	250.3	226.7	-16.3	-17.0	-14.7
	19	80.6	82.3	74.7	56.8	226.9	170.9	245.3	229.2	7.6	8.5	-14.7
	37	146.2	130.5	70.0	69.4	197.1	171.1	229.4	222.4	29.4	28.8	-14.7
	89	167.1	154.3	131.6	128.8	167.4	153.8	228.0	220.5	18.8	19.0	-14.7
MOREX_SP3_Couche 3 et 4 v2	11	35.3	78.4	17.0	5.1	243.0	177.2	250.3	226.7	-16.3	-17.0	-11.5
	19	54.7	57.6	74.7	56.8	248.6	207.7	245.3	229.2	7.6	8.5	-11.5
	37	109.2	110.4	70.0	69.4	237.4	215.6	229.4	222.4	29.4	28.8	-11.5
	89	175.0	162.1	131.6	128.8	197.9	184.3	228.0	220.5	18.8	19.0	-11.5
MOREX_SP3_Couche 3 et 4 v3	11	27.8	55.2	17.0	5.1	238.4	202.7	250.3	226.7	-16.3	-17.0	-12.5
	19	59.3	61.4	74.7	56.8	249.1	216.4	245.3	229.2	7.6	8.5	-12.5
	37	99.9	97.9	70.0	69.4	246.1	219.8	229.4	222.4	29.4	28.8	-12.5
	89	172.5	160.0	131.6	128.8	205.6	192.1	228.0	220.5	18.8	19.0	-12.5



Tableau 17 – Propriétés radiométriques des couches pour la campagne Morex2 et Morex3

Échantillon	Fréquence (GHz)	T BM (K)		T BM, SKY (K)		T BA (K)		T BA, SKY (K)		T BSKY (K)		T Abs
		H	V	H	V	H	V	H	V	H	V	
MOREX2_SP1_Couche 1	11	7.4	6.5	21.0	9.1	252.5	234.9	253.3	233.4	-14.6	-15.2	-12
	19	27.4	29.4	24.3	22.8	257.6	252.6	252.5	239.6	4.4	5.1	-12
	37	66.7	67.9	60.3	59.0	260.5	242.8	261.2	259.3	29.2	28.5	-12
	89	132.4	128.9	103.4	102.8	254.5	245.3	261.8	260.7	27.9	28.0	-12
MOREX2_SP1_Couche 2	11	12.6	8.4	21.0	9.1	244.4	218.2	253.3	233.4	-14.6	-15.2	-12
	19	41.0	44.0	24.3	22.8	238.1	204.6	252.5	239.6	4.4	5.1	-12
	37	93.1	88.8	60.3	59.0	215.9	194.0	261.2	259.3	29.2	28.5	-12
	89	150.4	146.4	103.4	102.8	186.1	181.9	261.8	260.7	27.9	28.0	-12
MOREX2_SP1_Couche 3	11	5.0	10.1	21.0	9.1	250.0	228.1	253.3	233.4	-14.6	-15.2	-15
	19	32.8	36.9	24.3	22.8	251.2	219.0	252.5	239.6	4.4	5.1	-15
	37	86.3	85.8	60.3	59.0	246.4	221.8	261.2	259.3	29.2	28.5	-15
	89	170.6	160.3	103.4	102.8	204.4	192.4	261.8	260.7	27.9	28.0	-15
MOREX2_SP1_Couche 4	11	9.0	2.2	21.0	9.1	239.9	172.5	253.3	233.4	-14.6	-15.2	-15
	19	45.9	45.6	24.3	22.8	235.6	177.1	252.5	239.6	4.4	5.1	-15
	37	107.6	97.2	60.3	59.0	214.3	189.9	261.2	259.3	29.2	28.5	-15
	89	170.8	166.0	103.4	102.8	182.1	176.4	261.8	260.7	27.9	28.0	-15
MOREX2_SP1_Couche 5	11	1.0	-0.9	21.0	9.1	247.3	214.1	253.3	233.4	-14.6	-15.2	-15
	19	27.6	28.8	24.3	22.8	251.6	213.3	252.5	239.6	4.4	5.1	-15
	37	78.9	76.1	60.3	59.0	246.6	226.4	261.2	259.3	29.2	28.5	-15
	89	157.3	148.6	103.4	102.8	171.7	164.2	261.8	260.7	27.9	28.0	-15
MOREX2_SP1_Couche 6	11	4.6	8.0	21.0	9.1	246.9	215.3	253.3	233.4	-14.6	-15.2	-15
	19	35.1	37.0	24.3	22.8	245.3	217.7	252.5	239.6	4.4	5.1	-15
	37	97.9	93.3	60.3	59.0	221.9	206.1	261.2	259.3	29.2	28.5	-15
	89	155.9	149.3	103.4	102.8	159.4	154.1	261.8	260.7	27.9	28.0	-15
MOREX2_SP1_Couche 7	11	20.6	18.7	21.0	9.1	242.0	212.9	253.3	233.4	-14.6	-15.2	-15
	19	43.9	41.1	24.3	22.8	237.1	185.8	252.5	239.6	4.4	5.1	-15
	37	113.1	99.8	60.3	59.0	210.4	186.3	261.2	259.3	29.2	28.5	-15
	89	162.2	153.6	103.4	102.8	162.2	156.7	261.8	260.7	27.9	28.0	-15
MOREX2_SP2_Couche 1	11	-3.9	-3.0	-0.5	-4.4	257.2	245.7	257.5	250.8			-15
	19	18.4	22.5	23.9	21.7	258.6	244.0	258.9	256.4			-15
	37	61.4	64.1	62.0	60.9	263.3	251.3	263.9	263.0			-15
	89	126.7	123.6	107.0	106.1	252.4	241.1	263.7	263.0			-15
MOREX2_SP2_Couche 2	11	7.4	20.9	-0.5	-4.4	252.3	213.0	257.5	250.8			-15
	19	46.2	40.9	23.9	21.7	245.4	204.9	258.9	256.4			-15
	37	100.0	95.7	62.0	60.9	226.6	209.8	263.9	263.0			-15
	89	154.1	148.8	107.0	106.1	197.7	190.8	263.7	263.0			-15
MOREX2_SP2_Couche 3	11	4.6	2.8	-0.5	-4.4	251.9	234.6	257.5	250.8			-15
	19	35.7	38.3	23.9	21.7	250.1	224.0	258.9	256.4			-15
	37	96.6	94.3	62.0	60.9	241.6	220.8	263.9	263.0			-15
	89	181.0	172.1	107.0	106.1	206.5	196.7	263.7	263.0			-15
MOREX2_SP2_Couche 4	11	8.1	6.2	-0.5	-4.4	232.5	204.6	257.5	250.8			-14
	19	45.9	50.8	23.9	21.7	232.0	209.3	258.9	256.4			-14
	37	119.4	113.9	62.0	60.9	215.7	205.1	263.9	263.0			-14
	89	179.1	172.2	107.0	106.1	185.4	178.8	263.7	263.0			-14
MOREX2_SP2_Couche 5	11	6.5	14.2	-0.5	-4.4	252.3	234.7	257.5	250.8			-14
	19	34.6	37.8	23.9	21.7	253.1	235.5	258.9	256.4			-14
	37	94.3	93.2	62.0	60.9	247.6	235.5	263.9	263.0			-14
	89	171.9	165.3	107.0	106.1	188.4	180.6	263.7	263.0			-14
MOREX2_SP2_Couche 4_bis	11	3.9	6.7	-0.5	-4.4	249.7	203.4	257.5	250.8			-13
	19	36.6	41.0	23.9	21.7	247.8	225.9	258.9	256.4			-13
	37	113.3	107.0	62.0	60.9	226.2	216.6	263.9	263.0			-13
	89	167.4	162.2	107.0	106.1	173.2	168.2	263.7	263.0			-13
MOREX3_SP1_Couche 1	11	3.4	9.1	7.0	2.8	255.5	243.0	259.9	258.0	-14.7	-15.1	-2.6
	19	26.0	28.1	17.1	17.9	260.0	233.4	262.0	260.5	0.2	1.4	-2.6
	37	81.3	80.1	74.1	73.9	262.4	247.1	266.2	264.6	44.2	43.1	-2.6
	89	181.5	177.2	129.2	128.3	254.0	243.0	267.9	266.6	77.9	77.9	-2.6
MOREX3_SP1_Couche 2	11	2.6	2.1	7.0	2.8	257.5	236.9	259.9	258.0	-14.7	-15.1	-2.6
	19	25.6	30.0	17.1	17.9	259.2	233.2	262.0	260.5	0.2	1.4	-2.6
	37	90.8	88.7	74.1	73.9	262.1	247.6	266.2	264.6	44.2	43.1	-2.6
	89	202.7	199.0	129.2	128.3	249.5	240.4	267.9	266.6	77.9	77.9	-2.6
MOREX3_SP1_Couche 3	11	2.6	2.1	7.0	2.8	257.5	236.9	259.9	258.0	-14.7	-15.1	-2.6
	19	25.6	30.0	17.1	17.9	259.2	233.2	262.0	260.5	0.2	1.4	-2.6
	37	90.8	88.7	74.1	73.9	262.1	247.6	266.2	264.6	44.2	43.1	-2.6
	89	202.7	199.0	129.2	128.3	249.5	240.4	267.9	266.6	77.9	77.9	-2.6
MOREX3_SP2_Couche 1	11	3.1	7.8	-6.3	-8.2	253.3	244.4	255.8	253.4	-19.5	-20.2	-4
	19	19.2	24.4	13.8	13.8	255.7	237.4	257.8	255.7	-6.0	-4.8	-4
	37	74.1	69.5	60.5	58.0	259.3	227.3	262.8	261.2	28.3	27.5	-4
	89	167.3	163.4	103.5	103.5	239.7	225.4	263.2	262.3	31.6	32.3	-4
MOREX3_SP2_Couche 1	11	2.5	3.5	-6.3	-8.2	251.9	228.5	255.8	253.4	-19.5	-20.2	-3
	19	27.9	25.6	13.8	13.8	251.5	220.4	257.8	255.7	-6.0	-4.8	-3
	37	81.0	79.7	60.5	58.0	258.8	240.7	262.8	261.2	28.3	27.5	-3
	89	180.2	177.1	103.5	103.5	238.0	226.7	263.2	262.3	31.6	32.3	-3
MOREX3_SP2_Couche 3	11	9.0	33.7	-6.3	-8.2	249.3	222.6	255.8	253.4	-19.5	-20.2	-3
	19	28.3	36.2	13.8	13.8	251.2	219.7	257.8	255.7	-6.0	-4.8	-3
	37	82.8	89.4	60.5	58.0	259.2	230.6	262.8	261.2	28.3	27.5	-3
	89	182.1	176.2	103.5	103.5	230.9	218.6	263.2	262.3	31.6	32.3	-3
MOREX3_SP2_Couche 4	11	11.5	19.5	-6.3	-8.2	245.5	212.9	255.8	253.4	-19.5	-20.2	-2
	19	39.9	43.9	13.8	13.8	242.9	216.1	257.8	255.7	-6.0	-4.8	-2
	37	100.8	98.7	60.5	58.0	242.0	223.0	262.8	261.2	28.3	27.5	-2
	89	195.5	187.3	103.5	103.5	203.0	195.7	263.2	262.3	31.6	32.3	-2
MOREX3_SP2_Couche 5	11	3.6	19.0	-6.3	-8.2	250.1	210.1	255.8	253.4	-19.5	-20.2	-1.8
	19	52.4	59.4	13.8	13.8	238.5	192.7	257.8	255.7	-6.0	-4.8	-1.8
	37	119.6	110.6	60.5	58.0	243.2	216.3	262.8	261.2	28.3	27.5	-1.8
	89	179.0	171.3	103.5	103.5	178.9	171.1	263.2	262.3	31.6	32.3	-1.8
MOREX3_SP2_Couche 6	11	16.0	27.5	-6.3	-8.2	244.9	203.3	255.8	253.4	-19.5	-20.2	-1.3
	19	80.5	78.0	13.8	13.8	226.3	195.7	257.8	255.7	-6.0	-4.8	-1.3
	37	146.6	137.5	60.5	58.0	211.4	198.7	262.8	261.2	28.3	27.5	-1.3
	89	176.7	170.2	103.5	103.5	178.1	172.0	263.2	262.3	31.6	32.3	-1.3

Tableau 18 – Propriétés radiométriques des couches pour la campagne de Umiujaq 2016, partie 1

Échantillon	Fréquence (GHz)	T BM (K)		T BM, SKY (K)		T BA (K)		T BA, SKY (K)		T BSKY (K)		T Abs
		H	V	H	V	H	V	H	V	H	V	
maison_sp1_Couche 1	11	7.4	10.7	5.6	2.8	247.2	218.0	229.5	222.4	-13.4	-13.9	-14
	19	21.0	24.7	14.2	14.1	249.4	220.9	247.4	245.2	-0.8	-0.1	-14
	37	81.1	79.2	61.7	60.8	254.1	225.4	252.3	250.0	40.7	39.9	-14
	89	168.9	164.9	99.3	98.0	243.9	217.8	254.7	253.6	53.4	53.2	-14
maison_sp1_Couche 2	11	11.0	17.1	5.6	2.8	248.6	220.1	229.5	222.4	-13.4	-13.9	-14
	19	21.0	25.9	14.2	14.1	249.2	220.6	247.4	245.2	-0.8	-0.1	-14
	37	80.6	83.9	61.7	60.8	255.1	223.5	252.3	250.0	40.7	39.9	-14
	89	165.2	164.3	99.3	98.0	242.5	225.1	254.7	253.6	53.4	53.2	-14
maison_sp1_Couche 3	11	9.9	12.4	5.6	2.8	246.2	221.7	229.5	222.4	-13.4	-13.9	-14
	19	26.9	32.8	14.2	14.1	247.7	219.1	247.4	245.2	-0.8	-0.1	-14
	37	91.2	92.1	61.7	60.8	254.2	227.4	252.3	250.0	40.7	39.9	-14
	89	187.4	180.4	99.3	98.0	244.5	227.1	254.7	253.6	53.4	53.2	-14
maison_sp1_Couche 4	11	8.8	12.2	5.6	2.8	242.2	211.9	229.5	222.4	-13.4	-13.9	-14
	19	31.5	39.5	14.2	14.1	242.7	205.7	247.4	245.2	-0.8	-0.1	-14
	37	98.8	101.7	61.7	60.8	251.0	211.8	252.3	250.0	40.7	39.9	-14
	89	196.7	187.4	99.3	98.0	238.7	222.6	254.7	253.6	53.4	53.2	-14
maison_sp1_Couche 5	11	18.0	22.8	5.6	2.8	243.3	199.4	229.5	222.4	-13.4	-13.9	-14
	19	39.5	52.8	14.2	14.1	250.2	189.2	247.4	245.2	-0.8	-0.1	-14
	37	104.9	106.8	61.7	60.8	256.0	211.7	252.3	250.0	40.7	39.9	-14
	89	205.1	195.0	99.3	98.0	246.5	229.6	254.7	253.6	53.4	53.2	-14
Tundra_SP1_Couche 1	11	-5.1	-6.1			244.2	220.6	250.2	248.6			-18
	19	22.8	22.0	13.8	13.6	245.5	217.2	250.7	248.9			-18
	37	71.7	70.9	53.7	52.8	248.2	227.0	255.8	254.5			-18
	89	169.8	158.1	83.1	82.2	222.8	208.8	254.3	253.4			-18
Tundra_SP1_Couche 2	11	-3.0	-2.9			244.2	207.9	250.2	248.6			-17.5
	19	22.4	26.6	13.8	13.6	245.9	212.1	250.7	248.9			-17.5
	37	83.7	80.2	53.7	52.8	242.9	219.5	255.8	254.5			-17.5
	89	162.0	151.0	83.1	82.2	193.1	182.2	254.3	253.4			-17.5
Tundra_SP1_Couche 3	11	-1.3	-3.8			244.5	212.5	250.2	248.6			-17
	19	26.4	25.5	13.8	13.6	243.0	215.9	250.7	248.9			-17
	37	103.5	96.0	53.7	52.8	227.4	213.8	255.8	254.5			-17
	89	159.0	153.7	83.1	82.2	162.5	156.6	254.3	253.4			-17
Tundra_SP1_Couche 4	11	20.1	22.1			242.8	212.9	250.2	248.6			-16.5
	19	60.7	59.8	13.8	13.6	239.1	216.2	250.7	248.9			-16.5
	37	133.2	123.7	53.7	52.8	215.5	203.3	255.8	254.5			-16.5
	89	165.9	161.1	83.1	82.2	168.4	163.5	254.3	253.4			-16.5
Tundra_SP2_Couche 1	11	-3.3	-1.7			245.5	214.2	250.2	248.6			-15
	19	21.7	29.9	13.8	13.6	250.0	216.8	250.7	248.9			-15
	37	83.6	83.2	53.7	52.8	255.3	224.0	255.8	254.5			-15
	89	187.7	176.6	83.1	82.2	246.6	223.6	254.3	253.4			-15
Tundra_SP2_Couche 2	11	-4.3	1.4			247.5	213.9	250.2	248.6			-15
	19	19.0	23.5	13.8	13.6	250.7	215.3	250.7	248.9			-15
	37	79.1	79.9	53.7	52.8	253.9	225.4	255.8	254.5			-15
	89	189.6	176.8	83.1	82.2	212.6	199.9	254.3	253.4			-15
Tundra_SP2_Couche 3	11	15.0	10.6			227.4	198.4	250.2	248.6			-15
	19	45.0	43.7	13.8	13.6	216.2	190.0	250.7	248.9			-15
	37	110.7	105.7	53.7	52.8	212.4	197.2	255.8	254.5			-15
	89	175.3	169.1	83.1	82.2	176.3	169.9	254.3	253.4			-15
foret_sp3_Couche 1	11	-4.2	-5.2	-5.3	-7.0	261.7	248.1	264.0	263.1	-17.6	-18.3	-3
	19	25.8	25.9	30.7	31.4	263.3	252.9	264.9	263.6	6.5	7.0	-3
	37	85.6	85.8	86.6	86.2	267.0	240.9	269.3	268.3	48.4	48.1	-3
	89	177.6	174.7	155.9	155.2	259.0	247.4	268.7	268.2	80.2	79.8	-3
foret_sp3_Couche 2	11	-4.4	-4.2	-5.3	-7.0	261.1	242.9	264.0	263.1	-17.6	-18.3	-2.5
	19	24.6	25.3	30.7	31.4	262.9	244.4	264.9	263.6	6.5	7.0	-2.5
	37	83.9	87.2	86.6	86.2	266.3	254.4	269.3	268.3	48.4	48.1	-2.5
	89	189.9	182.5	155.9	155.2	245.7	238.5	268.7	268.2	80.2	79.8	-2.5
foret_sp3_Couche 3	11	-0.6	1.0	-5.3	-7.0	257.1	231.9	264.0	263.1	-17.6	-18.3	-2
	19	34.1	37.5	30.7	31.4	258.8	236.4	264.9	263.6	6.5	7.0	-2
	37	106.9	106.5	86.6	86.2	259.0	247.2	269.3	268.3	48.4	48.1	-2
	89	213.5	206.0	155.9	155.2	221.2	213.3	268.7	268.2	80.2	79.8	-2
foret_sp3_Couche 4	11	4.3	4.9	-5.3	-7.0	257.3	236.3	264.0	263.1	-17.6	-18.3	-2
	19	50.1	47.6	30.7	31.4	253.9	229.3	264.9	263.6	6.5	7.0	-2
	37	136.2	127.4	86.6	86.2	238.3	229.5	269.3	268.3	48.4	48.1	-2
	89	192.2	188.3	155.9	155.2	200.8	197.1	268.7	268.2	80.2	79.8	-2
foret_sp3_Couche 5	11	1.0	-0.8	-5.3	-7.0	257.9	229.7	264.0	263.1	-17.6	-18.3	-2.2
	19	46.6	47.1	30.7	31.4	257.4	236.2	264.9	263.6	6.5	7.0	-2.2
	37	130.9	125.8	86.6	86.2	248.9	237.5	269.3	268.3	48.4	48.1	-2.2
	89	213.5	208.7	155.9	155.2	214.4	209.8	268.7	268.2	80.2	79.8	-2.2

Tableau 19 – Propriétés radiométriques des couches pour la campagne de Umiujaq 2016, partie 2

Échantillon	Fréquence (GHz)	T BM (K)		T BM, SKY (K)		T BA (K)		T BA, SKY (K)		T BSKY (K)		T Abs
		H	V	H	V	H	V	H	V	H	V	
Arbustes_SP4_Couche 1	11	6.3	10.6	0.2	-3.1	230.1	192.9	240.0	237.5	-23.5	-24.1	-25.3
	19	38.2	41.3	19.0	18.6	227.9	194.1	242.3	240.6	0.4	1.3	-25.3
	37	96.9	93.8	58.2	56.7	215.9	191.9	246.9	245.6	29.8	28.7	-25.3
	89	190.6	178.3	89.8	88.1	217.4	203.6	245.9	244.7	26.2	25.7	-25.3
Arbustes_SP4_Couche 2	11	12.5	30.6	0.2	-3.1	233.7	195.7	240.0	237.5	-23.5	-24.1	-25.3
	19	33.0	40.9	19.0	18.6	237.9	198.9	242.3	240.6	0.4	1.3	-25.3
	37	82.4	83.6	58.2	56.7	243.0	209.6	246.9	245.6	29.8	28.7	-25.3
	89	173.3	166.2	89.8	88.1	232.5	215.3	245.9	244.7	26.2	25.7	-25.3
Arbustes_SP4_Couche 3	11	4.7	6.9	0.2	-3.1	235.9	210.8	240.0	237.5	-23.5	-24.1	-25.4
	19	24.1	30.9	19.0	18.6	239.4	206.2	242.3	240.6	0.4	1.3	-25.4
	37	76.8	77.8	58.2	56.7	243.5	212.3	246.9	245.6	29.8	28.7	-25.4
	89	173.5	162.2	89.8	88.1	227.4	206.0	245.9	244.7	26.2	25.7	-25.4
Arbustes_SP4_Couche 4	11	4.2	17.2	0.2	-3.1	236.2	208.3	240.0	237.5	-23.5	-24.1	-24.7
	19	32.0	43.0	19.0	18.6	241.1	207.4	242.3	240.6	0.4	1.3	-24.7
	37	95.0	93.3	58.2	56.7	243.5	212.7	246.9	245.6	29.8	28.7	-24.7
	89	199.7	186.3	89.8	88.1	208.4	194.9	245.9	244.7	26.2	25.7	-24.7
lac_SP4_Couche c1lac	11	4.9	3.6	0.2	-3.1	220.0	194.3	240.0	237.5	-23.5	-24.1	-24.5
	19	47.6	45.6	19.0	18.6	216.5	190.3	242.3	240.6	0.4	1.3	-24.5
	37	103.2	101.7	58.2	56.7	225.0	204.8	246.9	245.6	29.8	28.7	-24.5
	89	193.5	184.8	89.8	88.1	223.3	212.5	245.9	244.7	26.2	25.7	-24.5
lac_SP4_Couche c2lac	11	1.1	3.1	0.2	-3.1	229.8	197.7	240.0	237.5	-23.5	-24.1	-24.2
	19	32.6	35.3	19.0	18.6	231.2	207.0	242.3	240.6	0.4	1.3	-24.2
	37	94.4	92.8	58.2	56.7	230.5	214.5	246.9	245.6	29.8	28.7	-24.2
	89	178.3	169.5	89.8	88.1	183.7	175.5	245.9	244.7	26.2	25.7	-24.2
Foret_SP5_Couche 1	11	-12.2	-13.3	-13.0	-14.4	237.9	221.7	240.3	239.6	-24.4	-24.9	-25
	19	24.7	26.4	34.0	34.4	241.2	221.1	246.2	245.1	-1.7	-0.7	-25
	37	61.7	62.1	53.6	52.7	245.8	229.7	246.8	245.7	30.1	28.9	-25
	89	126.2	126.2	84.1	83.3	231.4	215.9	245.9	245.0	26.4	26.3	-25
Foret_SP5_Couche 2	11	-10.7	-7.6	-13.0	-14.4	237.7	222.5	240.3	239.6	-24.4	-24.9	-25
	19	18.8	25.7	34.0	34.4	241.2	222.0	246.2	245.1	-1.7	-0.7	-25
	37	70.6	75.5	53.6	52.7	246.2	222.1	246.8	245.7	30.1	28.9	-25
	89	156.5	154.0	84.1	83.3	236.1	216.0	245.9	245.0	26.4	26.3	-25
Foret_SP5_Couche 3	11	-10.3	-4.9	-13.0	-14.4	237.2	220.8	240.3	239.6	-24.4	-24.9	-25
	19	20.5	28.5	34.0	34.4	240.7	214.2	246.2	245.1	-1.7	-0.7	-25
	37	73.4	79.4	53.6	52.7	244.8	215.7	246.8	245.7	30.1	28.9	-25
	89	170.1	164.6	84.1	83.3	229.8	212.0	245.9	245.0	26.4	26.3	-25
Foret_SP5_Couche 4	11	-10.6	-11.8	-13.0	-14.4	237.8	216.6	240.3	239.6	-24.4	-24.9	-25
	19	20.7	23.1	34.0	34.4	241.4	203.5	246.2	245.1	-1.7	-0.7	-25
	37	72.2	72.0	53.6	52.7	246.4	224.6	246.8	245.7	30.1	28.9	-25
	89	174.6	166.6	84.1	83.3	231.5	216.8	245.9	245.0	26.4	26.3	-25
Foret_SP5_Couche 5	11	-10.6	-9.0	-13.0	-14.4	236.6	208.3	240.3	239.6	-24.4	-24.9	-25
	19	22.2	25.8	34.0	34.4	240.4	203.5	246.2	245.1	-1.7	-0.7	-25
	37	77.3	75.5	53.6	52.7	243.4	223.6	246.8	245.7	30.1	28.9	-25
	89	179.3	170.2	84.1	83.3	198.7	189.7	245.9	245.0	26.4	26.3	-25
Foret_SP5_Couche 6	11	-8.4	-4.2	-13.0	-14.4	232.9	207.8	240.3	239.6	-24.4	-24.9	-25
	19	23.7	28.3	34.0	34.4	238.5	204.9	246.2	245.1	-1.7	-0.7	-25
	37	88.0	88.7	53.6	52.7	243.8	221.7	246.8	245.7	30.1	28.9	-25
	89	207.2	197.5	84.1	83.3	219.7	207.2	245.9	245.0	26.4	26.3	-25
Foret_SP5_Couche 7	11	-5.6	-5.0	-13.0	-14.4	228.3	185.0	240.3	239.6	-24.4	-24.9	-25
	19	43.4	34.1	34.0	34.4	218.4	148.0	246.2	245.1	-1.7	-0.7	-25
	37	126.0	117.4	53.6	52.7	205.4	188.5	246.8	245.7	30.1	28.9	-25
	89	160.8	155.5	84.1	83.3	161.4	154.8	245.9	245.0	26.4	26.3	-25
Foret_SP5_Couche 8	11	5.7	6.3	-13.0	-14.4	226.2	190.2	240.3	239.6	-24.4	-24.9	-25
	19	59.6	57.7	34.0	34.4	214.4	189.3	246.2	245.1	-1.7	-0.7	-25
	37	120.3	113.1	53.6	52.7	193.8	184.7	246.8	245.7	30.1	28.9	-25
	89	181.8	175.0	84.1	83.3	174.9	169.5	245.9	245.0	26.4	26.3	-25
Tundra_SP6_Couche 1	11	-5.0	-1.1	-2.6	-8.3	234.9	209.8	239.5	234.5	-24.9	-25.5	-24
	19	22.3	26.9	21.2	21.0	240.1	213.4	243.1	240.1	-0.7	0.3	-24
	37	72.8	77.2	53.7	52.6	245.2	222.9	247.9	246.5	28.9	27.7	-24
	89	162.3	162.6	84.0	83.1	232.0	218.9	246.7	245.6	24.9	24.9	-24
Tundra_SP6_Couche 2	11	-4.3	-1.8	-2.6	-8.3	234.7	201.8	239.5	234.5	-24.9	-25.5	-24
	19	21.1	27.9	21.2	21.0	239.4	203.0	243.1	240.1	-0.7	0.3	-24
	37	68.6	65.1	53.7	52.6	244.7	217.3	247.9	246.5	28.9	27.7	-24
	89	172.6	160.0	84.0	83.1	211.8	197.1	246.7	245.6	24.9	24.9	-24
Tundra_SP6_Couche 3	11	1.4	-2.7	-2.6	-8.3	219.5	183.7	239.5	234.5	-24.9	-25.5	-24
	19	34.2	32.9	21.2	21.0	219.6	187.7	243.1	240.1	-0.7	0.3	-24
	37	119.8	114.2	53.7	52.6	206.3	194.9	247.9	246.5	28.9	27.7	-24
	89	178.5	172.9	84.0	83.1	179.0	173.1	246.7	245.6	24.9	24.9	-24
Tundra_SP6_Couche 4	11	-5.2	-7.8	-2.6	-8.3	229.9	187.2	239.5	234.5	-24.9	-25.5	-24
	19	42.4	40.5	21.2	21.0	224.0	199.5	243.1	240.1	-0.7	0.3	-24
	37	110.4	104.8	53.7	52.6	212.2	199.2	247.9	246.5	28.9	27.7	-24
	89	175.3	169.7	84.0	83.1	180.3	174.4	246.7	245.6	24.9	24.9	-24
Tundra_SP6_Couche 3bis	11	3.5	13.4	-2.6	-8.3	224.2	162.3	239.5	234.5	-24.9	-25.5	-24
	19	40.0	48.4	21.2	21.0	229.0	190.9	243.1	240.1	-0.7	0.3	-24
	37	102.5	98.4	53.7	52.6	228.4	209.6	247.9	246.5	28.9	27.7	-24
	89	186.3	178.4	84.0	83.1	191.7	185.5	246.7	245.6	24.9	24.9	-24

## 6.2 Complément de résultats des mesures des coefficients de diffusion inversés

Les graphiques présentés dans cette section représentent la relation entre les coefficients de diffusion calculés par la méthode du sandwich à 6 flux avec la densité et le Rayon optique. On observe aux graphiques 36 et 37 que la tendance est significative à 37 et 89 GHz, alors que la relation n'est pas significative à 19 et 10 GHz, ce qui correspond bien à la théorie. Au graphique 38, les valeurs inversées sont comparées aux valeurs des coefficients de diffusion extraits de DMRT-ML. Nous notons également dans toutes ces figures un regroupement des mesures par type de grain, mais cette relation est faible et serait à évaluer.

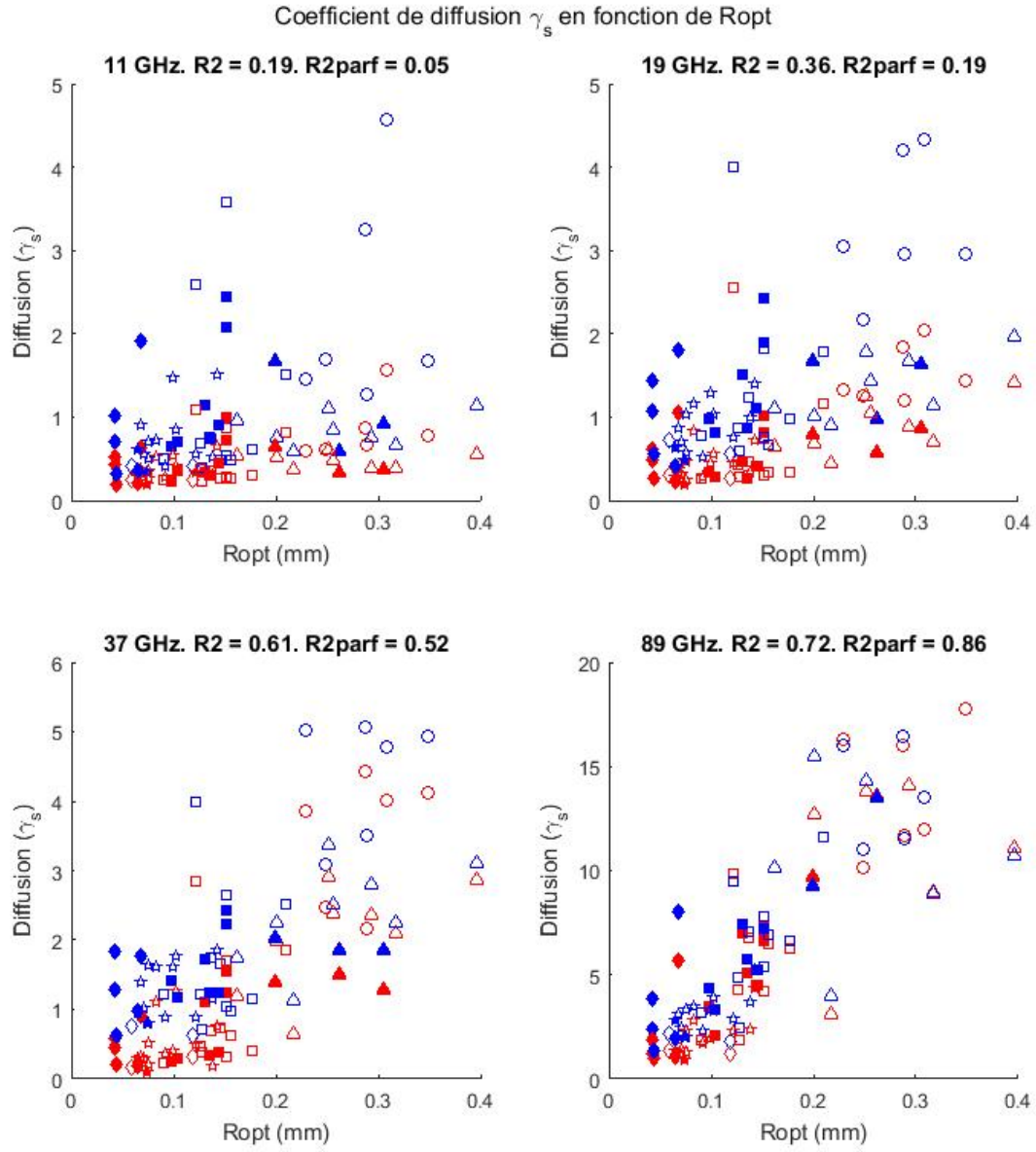


Figure 36 – Graphique reliant le  $R_{IRIS}$  aux coefficients de diffusion

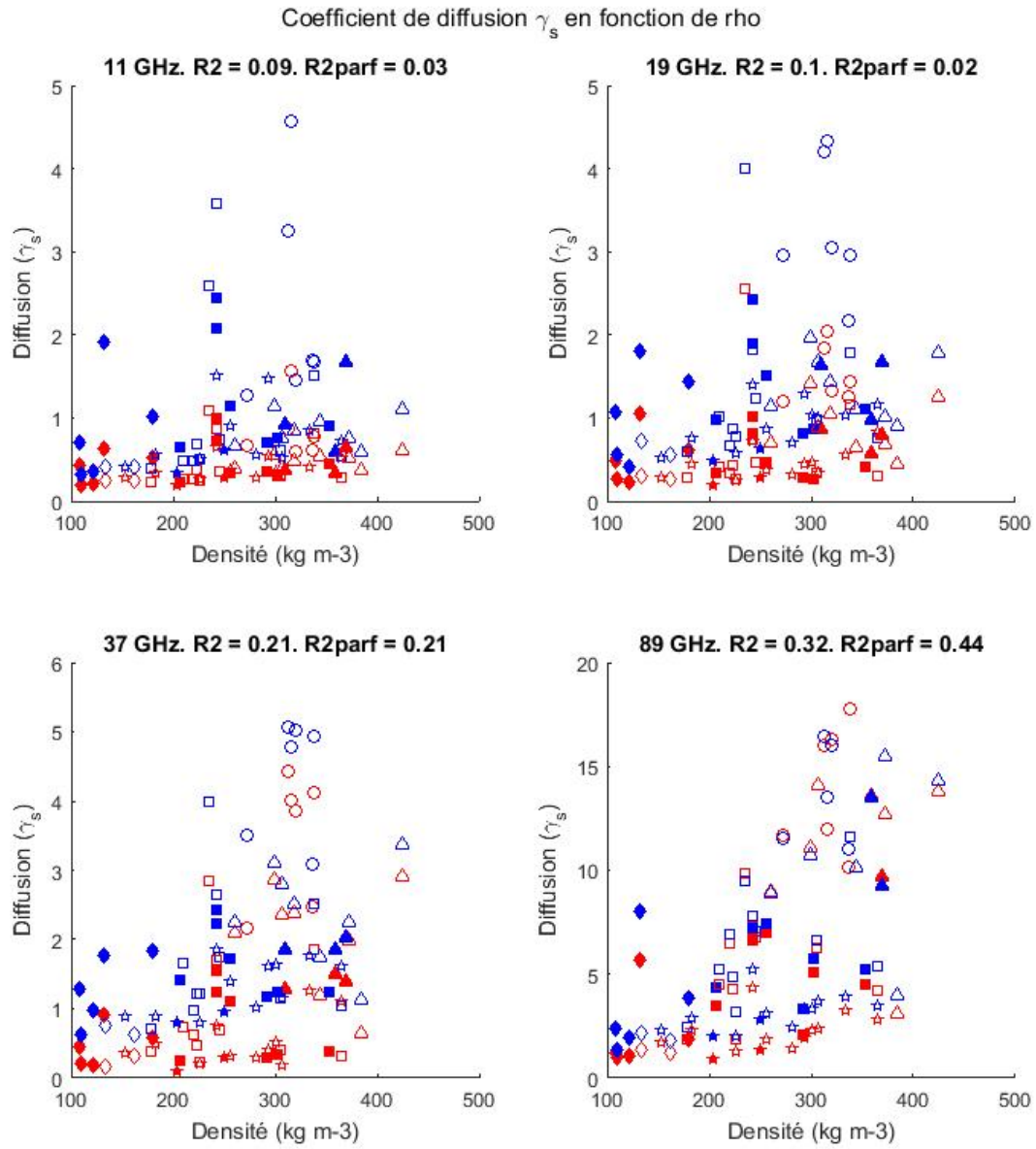


Figure 37 – Graphiques reliant  $\rho_{couteau}$  aux coefficients de diffusion

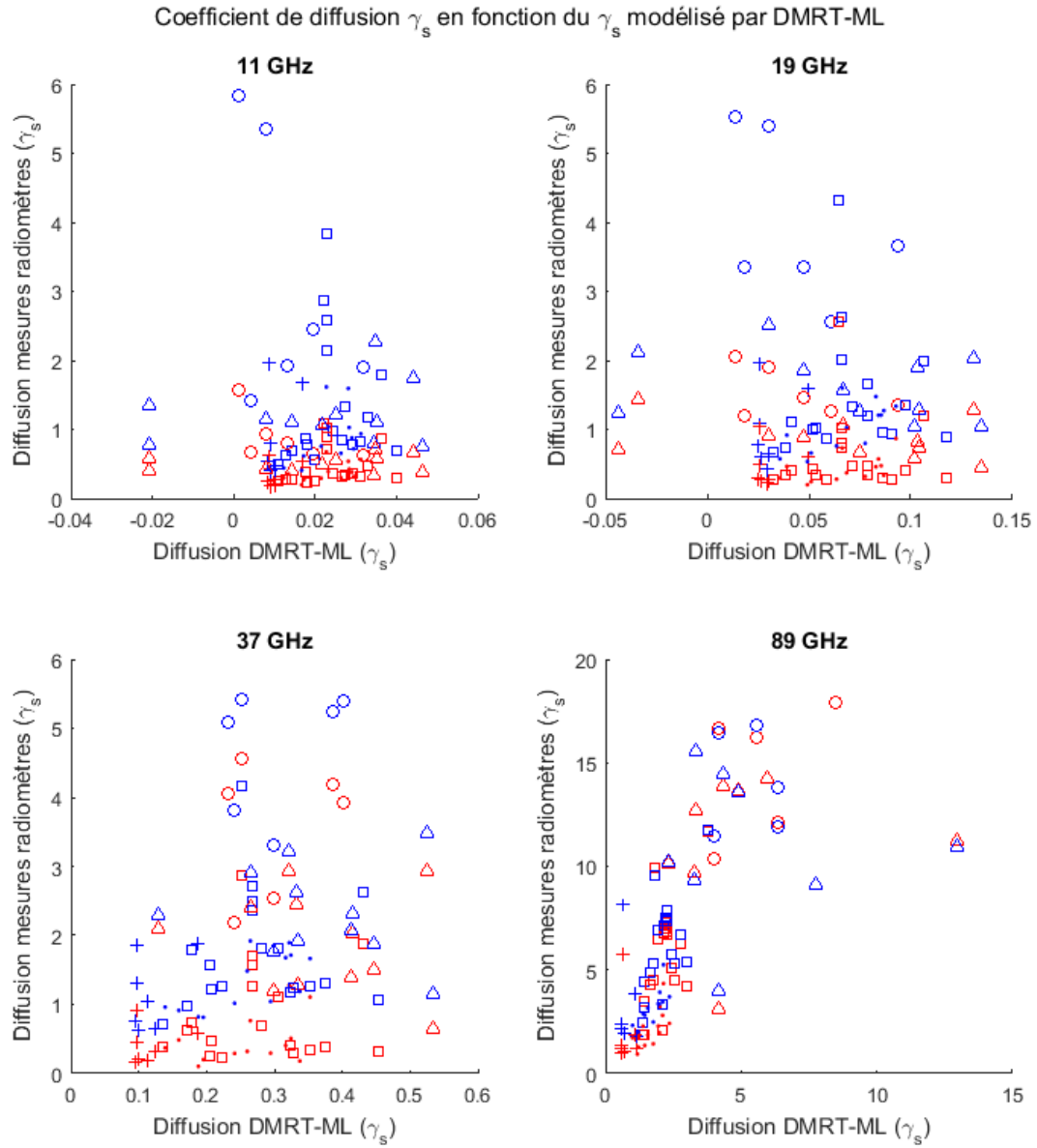


Figure 38 – Graphiques reliant les coefficients de diffusion à ceux simulés par DMRT-ML, pour l'ensemble des couches

### 6.3 Complément de résultats des mesures des coefficients d'absorption inversés

Les graphiques présentés dans cette section représentent la relation entre les coefficients d'absorption calculés par la méthode du sandwich à 6 flux avec la densité et le Rayon optique. On observe aux graphiques 39 et 40 que la tendance est significative à 37 et 89 GHz, alors que la relation n'est pas significative à 19 et 10 GHz, ce qui correspond bien à la théorie. Au graphique 41, les valeurs inversées sont comparées aux valeurs des coefficients de diffusion extraits de DMRT-ML. Nous notons également dans toutes ces figures un regroupement des mesures par type de grain, mais cette relation est faible et serait à évaluer.



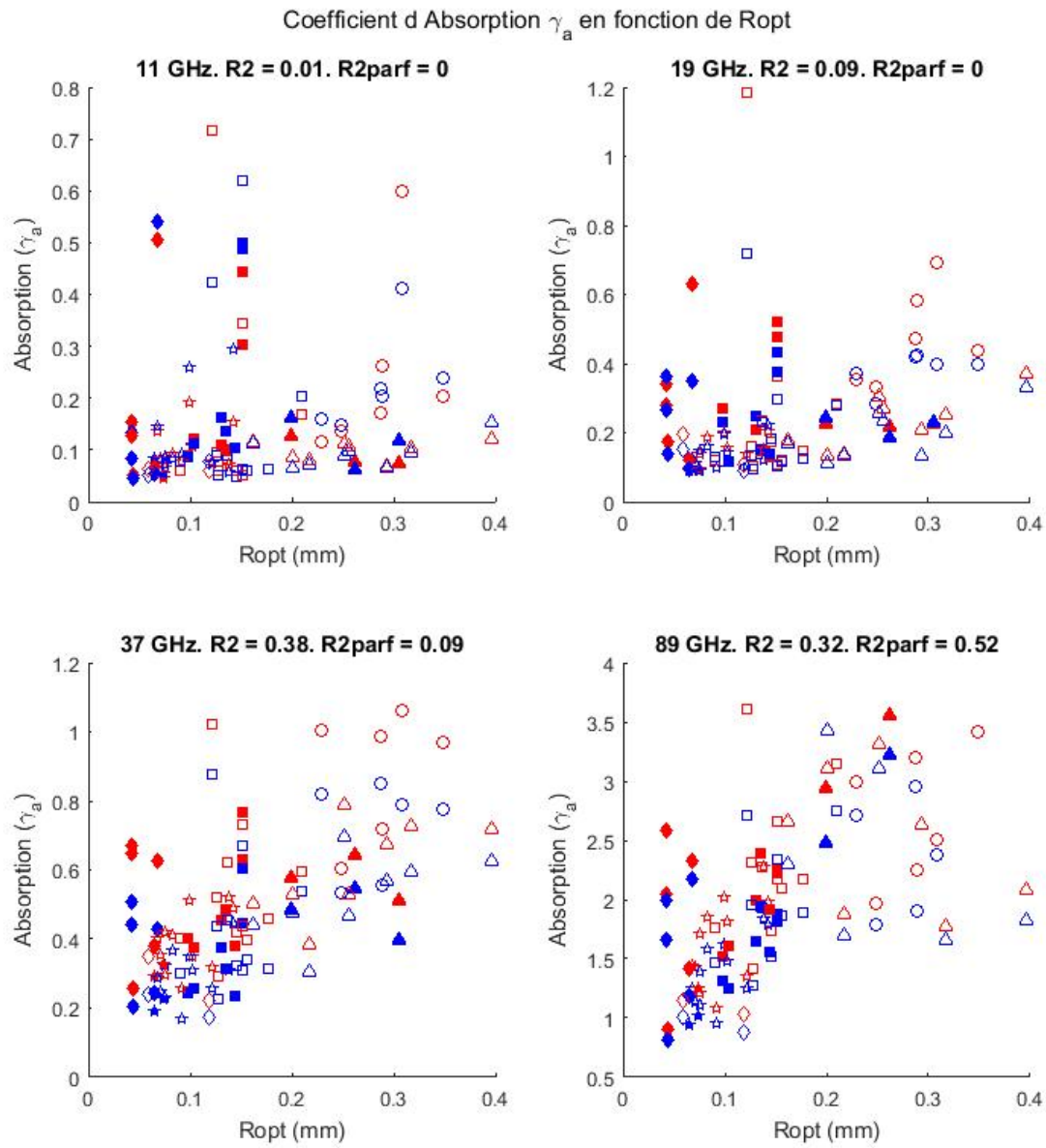


Figure 39 – Graphique reliant le  $R_{IRIS}$  aux coefficients d'absorption

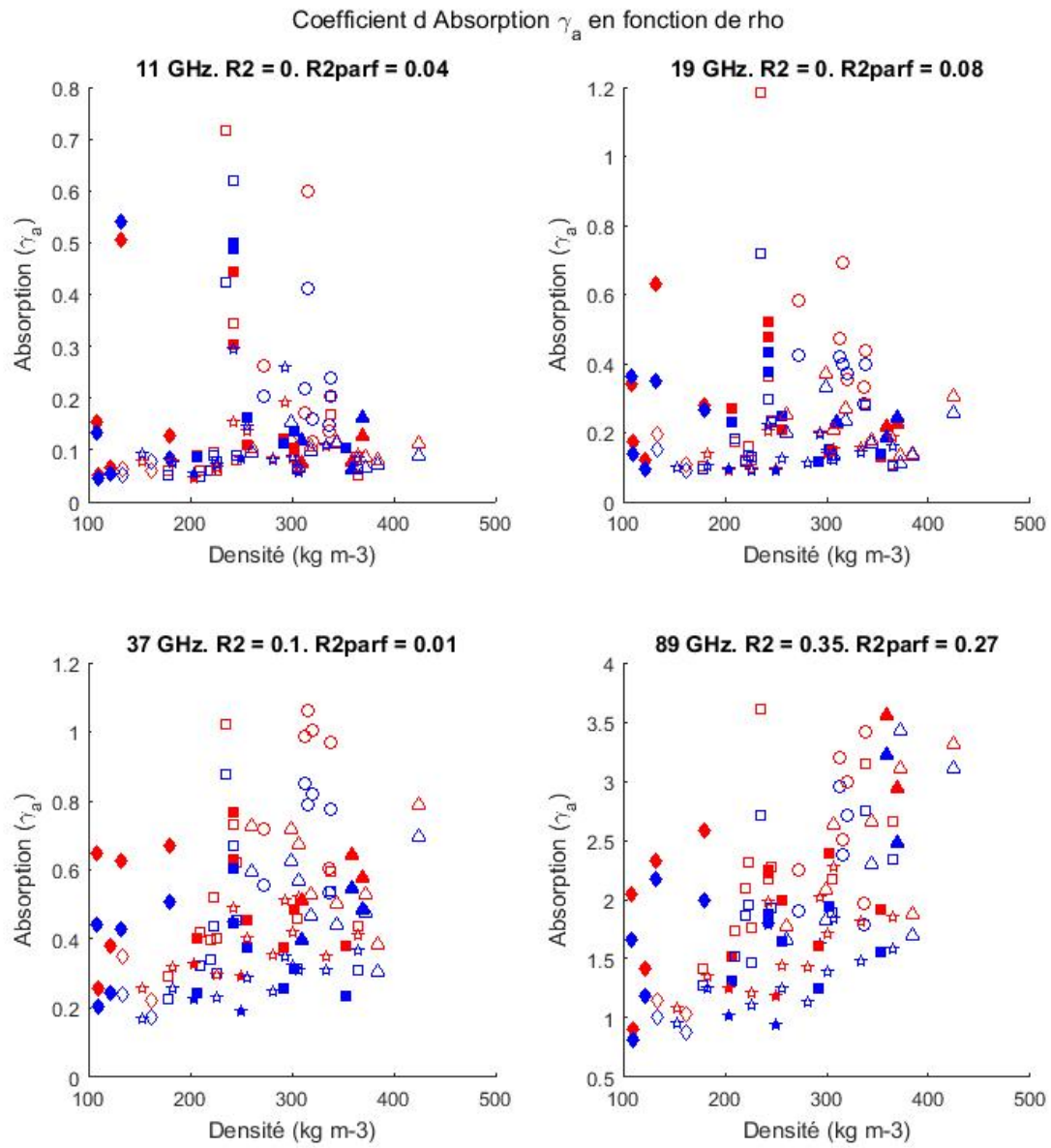


Figure 40 – Graphiques reliant  $\rho_{couteau}$  aux coefficients d'absorption

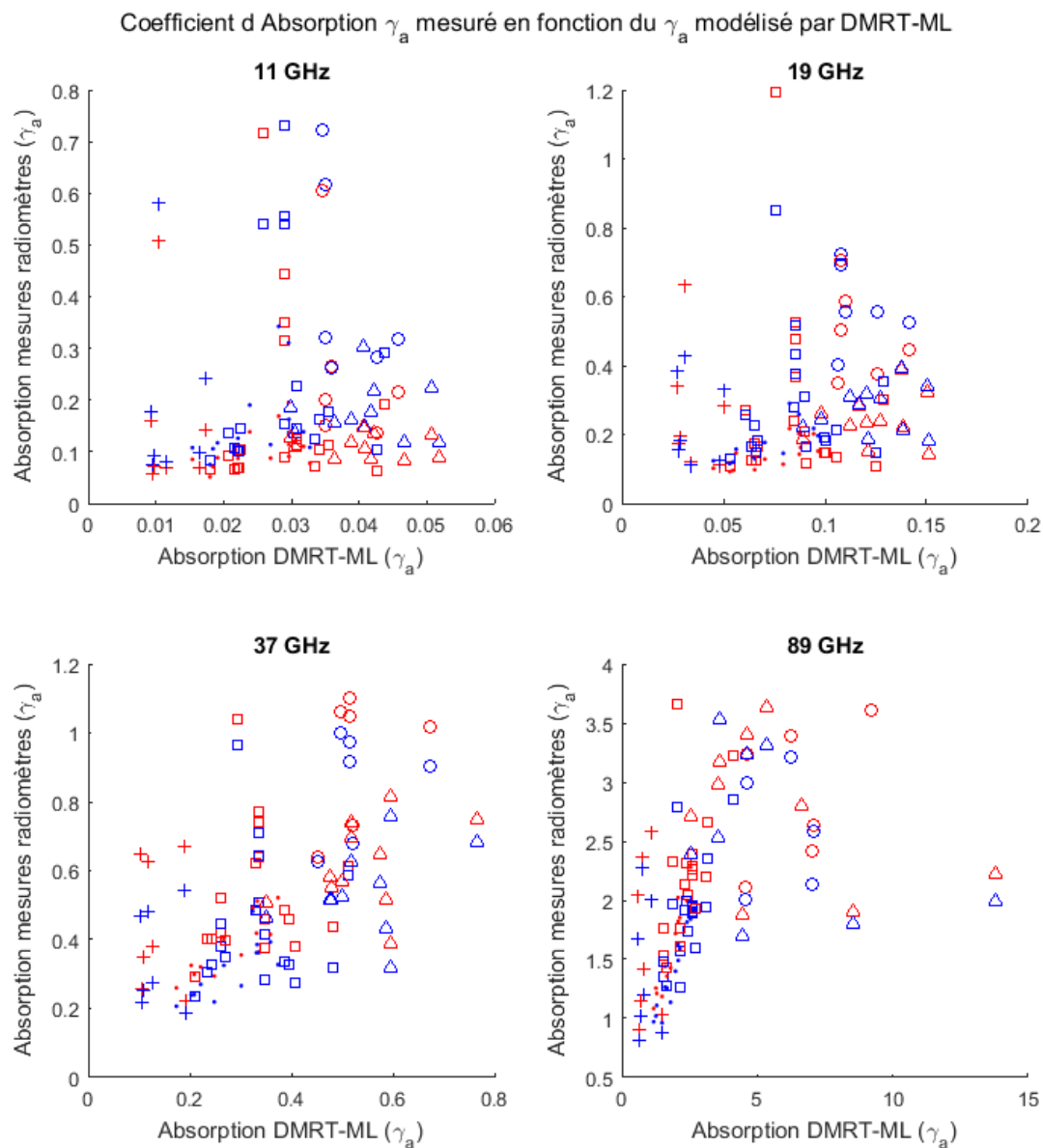


Figure 41 – Graphiques reliant les coefficients d'absorption à ceux simulés par DMRT-ML, pour l'ensemble des couches

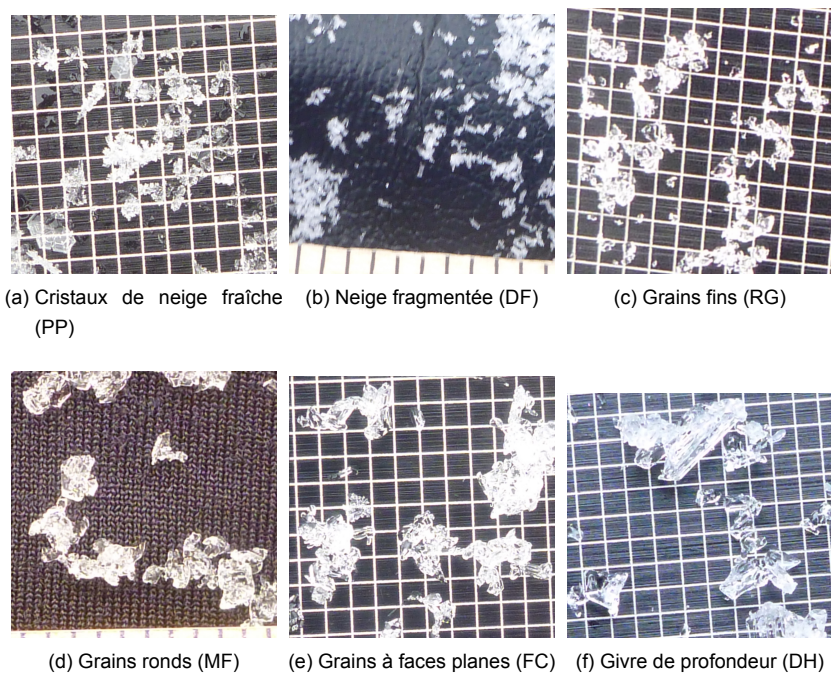
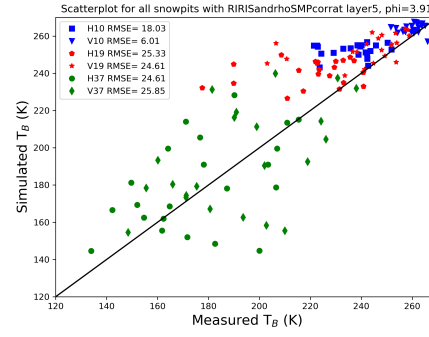
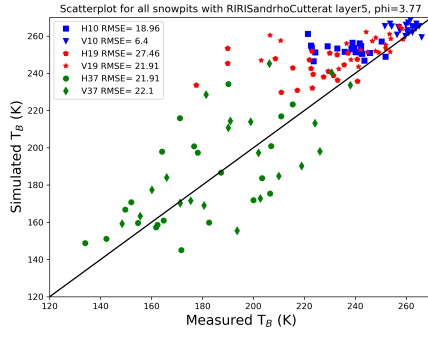
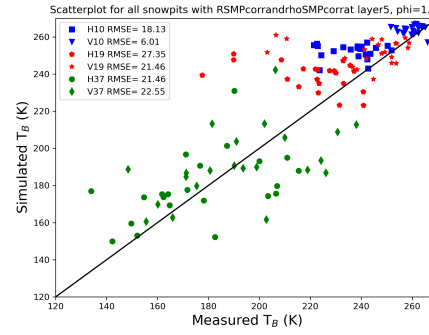
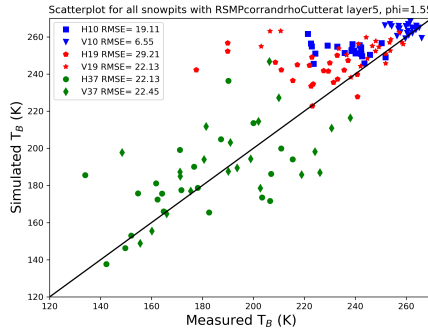


Figure 42 – Photographies des différents types de grains identifiés lors des campagnes. Chaque image représente une surface d'environ  $10 \times 10$  mm



(a)  $R_{IRIS}$  et  $\rho_{couteau}$ , avec  $\Phi_0 = 3.77$  et  $h = 5$  cm (b)  $R_{IRIS}$  et  $\rho_{SMPcalib}$ , avec  $\Phi_0 = 3.91$  et  $h = 5$  cm



(c)  $R_{SMP}$  et  $\rho_{couteau}$ , avec  $\Phi_0 = 1.55$  et  $h = 5$  cm (d)  $R_{SMP}$  et  $\rho_{SMPcalib}$ , avec  $\Phi_0 = 1.62$  et  $h = 5$  cm

Figure 43 – Comparaison des  $T_B$  simulés avec le modèle DMRT-ML par rapport aux valeurs mesurées pour 3 fréquences (11, 19 et 37 GHz et pour quatre combinaisons de paramètres d'entrée (a,b,c, et d) sur un pas d'échantillonnage de 5 cm. Pour chacun des cas, le facteur multiplicatif optimisé est noté  $\Phi_0$

Tableau 20 – Propriétés statistiques de modélisation pour le  $\Phi_0$  (couche de 5 cm) avec  $\rho_{SMPcalib}$

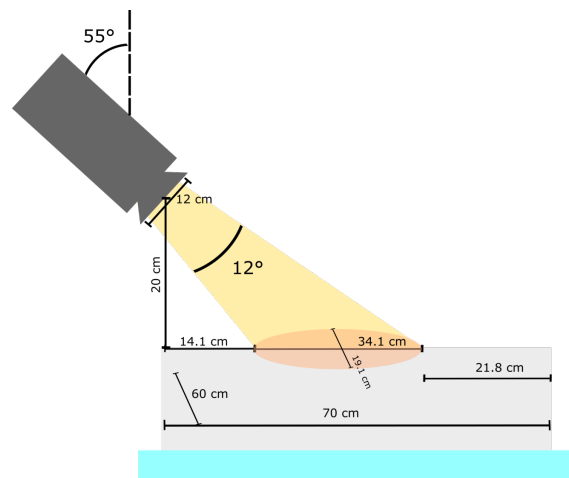
Param $R$	Param $\rho$	$\Phi$	$RMSE_{37V}$	$Bias_{37V}$	$R^2_{37V}$	$pente_{37V}$	$RMSE_{glob}$	$Bias_{glob}$	$R^2_{glob}$	$pente_{glob}$
$R_{IRIS}$	$\rho_{couteau}$	3.77	18.4	-0.1	0.55	0.82	19.0	-9.2	0.78	0.96
$R_{IRIS}$	$\rho_{SMP}$	3.91	21.7	-0.3	0.42	0.74	19.3	-8.4	0.77	0.94
$R_{SMP}$	$\rho_{couteau}$	1.55	21.9	-1.7	0.34	0.57	20.7	-9.7	0.73	0.89
$R_{SMP}$	$\rho_{SMP}$	1.62	19.3	0.4	0.41	0.55	19.2	-7.9	0.75	0.90

## 7 Complément d'information sur les instruments utilisés

### 7.1 Les radiomètres

La mesure de l'émission micro-ondes du sol est effectuée à l'aide de radiomètres terrain (PR-series, Radiometrics, Boulder, CO), qui opèrent aux fréquences de 10.67, 19.0, 37.0 et 89.0 GHz (notées 10, 19, 37 et 89 GHz). Ces radiomètres mesurent le signal en polarisation linéaire horizontale H et verticale V, et sont orientés avec un angle d'incidence de  $55^\circ$  par rapport au nadir. Cet angle est employé en télédétection micro-ondes passives[12] pour mettre en évidence les effets de polarisation de la surface terrestre. En effet, près de l'angle de Brewster de l'eau, la réflexion à la surface du manteau neigeux pour les micro-ondes en polarisation V et de maximiser la différence entre l'information mesurée en polarisation horizontale H et V provenant du sol et du manteau neigeux. Pour assurer la validité des mesures  $T_B$ , les radiomètres sont calibrés avec une cible chaude et froide selon un protocole défini par Asmus and Grant, 1999[2]. Ainsi, avant et après les campagnes de terrain, une mesure est réalisée sur des cibles à température ambiante ( $\approx 290$  K) et à la température de l'azote liquide ( $= 77$  K), ce qui nous donne une précision de l'ordre de  $\pm 2$  K dans la gamme de température mesurée. Cependant, pour les mesures du ciel à très basse température ( $< 50$  K), la précision des données se dégrade.

Ces fréquences ont été choisies pour correspondre aux fréquences d'opération des radiomètres imageurs satellitaires (SSM/I, SSMIS, AMSR-E, AMSR2) qui permettent d'étudier les propriétés de la surface terrestre.



(a) Dimensions maximales du champ de vision des radiomètres

Figure 44 – Les dimensions du champ de vision maximal des radiomètres sont indiquées dans ce graphique. On démontre par le calcul que la couche de neige étudiée de 60 par 70 cm était plus grande que le champs de vision du radiomètre.



Figure 45 – Photographie des radiomètres montés sur le traineau mobile (45a) et du montage utilisé pour la caractérisation des couches (45b)

## 7.2 Le SMP

### 7.2.1 Description de l'appareil

Le micro-pénétrromètre (Snow Micro-Penetrometer : SMP, Schneebeli 1999 [53]) est un instrument développé à l'institut des avalanches (SLF) à Davos en Suisse, qui permet d'obtenir rapidement des informations micro-structurelles sur un profil neigeux jusqu'à une profondeur de 1.7 m par pénétrrométrie à vitesse constante. Cet appareil a été conçu pour détecter les conditions structurelles en milieu avalancheux, et il est possible de le déplacer et de prendre des mesures rapidement. Constitué d'une tige métallique dont la pointe comporte un dynamomètre piézoélectrique qui pénètre le manteau neigeux à vitesse constante, cet instrument réalise un profil vertical à haute résolution de la force de rupture de la neige et de la texture du manteau neigeux. La mesure de la force de résistance aux ruptures des grains au niveau de la pointe permet de calculer des paramètres structuraux comme la densité, la longueur de corrélation, et la SSA de la neige (Proksch et al., 2015[43]), avec une erreur relative respective de 10.6%, 16.4%, 23.1%. De plus, cette mesure est effectuée sur une échelle beaucoup plus fine que les échantillonnages traditionnels, ce qui nous amène à envisager l'utilisation de ces mesures de la microstructure pour obtenir de nouvelles informations sur la texture de la neige. Le SMP mesure la force de rupture au niveau de sa pointe dans un intervalle de 0.01 N pour de la neige molle jusqu'à 40 N pour la neige compacte ; Le SMP peut sonder la neige jusqu'à une profondeur de 1.7 m avec une vitesse de mesure constante de  $20 \text{ mm} \cdot \text{s}^{-1}$  (Proksch et al., 2015[42]). Le profil vertical de la force  $F(z)$  est mesuré à une résolution de 254 points par millimètre. Les paramètres  $L$  et  $\tilde{F}$  représentant respectivement la taille de l'élément structurel et la force moyenne sont ensuite calculés à partir de ce signal sur une fenêtre de 2.5 mm, en utilisant un modèle de bruit de grenaille avec une



statistique en distribution de Poisson (voir Löwe et al., 2012[24]). La pointe sensible située à l'extrémité du SMP comporte un capteur piézoélectrique, dont la fonction peut se comparer à l'utilisation d'un microphone qui enregistrerait le son que font les grains de neige lorsqu'on y fait pénétrer une pointe. Il est intéressant de noter qu'on peut observer que le son que produit la neige lorsqu'on marche ou qu'on la manipule est un paramètre observable de façon purement qualitative qui semble effectivement lié à sa microstructure, et il serait très intéressant de développer une méthodologie qui met en relation cet observable macroscopique aux propriétés structurales microscopiques.

### 7.2.2 Calcul des paramètres microstructuraux

Le calcul des paramètres microstructuraux à partir du signal brut mesuré par le SMP implique un procédé de sélection, de tri, de lissage et de calcul par des modèles empiriques que nous exposons ici avec plus de détails.

Les profils peuvent parfois être interrompus lorsqu'ils rencontrent un obstacle comme une couche de glace. Lorsque la force enregistrée par la pointe dépasse un seuil maximal de 40 N la prise de mesures est interrompue et la tige remonte à sa position de départ. Dans cette situation, la hauteur de la couche ayant provoqué l'interruption est notée, puis cette couche est retirée délicatement et nous poursuivons la mesure à partir de cette position. Le profil est ensuite reconstruit à partir de ces mesures partielles pour nous permettre de reconstituer un profil complet, en insérant une couche de glace. Pour chaque site, entre quatre et six mesures du SMP sont réalisées aux alentours du snowpit, séparés d'une distance d'environ 30 cm.

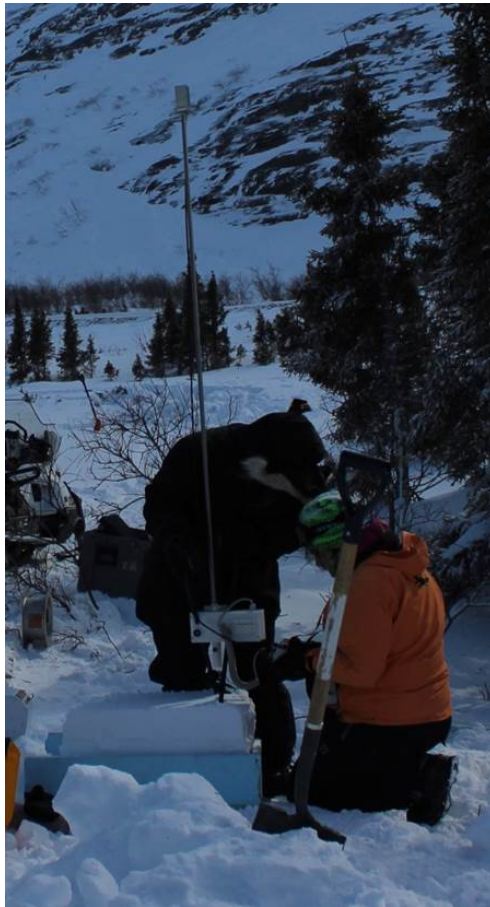
Les mesures SMP présentent un certain taux d'erreurs et d'artefacts que nous devons chercher à éliminer. Un tri préliminaire des mesures propres à l'utilisation a été réalisé en conservant uniquement les profils de type "C1" du système de classification de la qualité des profils (Pielmeier et al., 2009[40]). Cette classification élimine les signaux contenant des tendances linéaires sur plusieurs millimètres, ou des zones de variance nulle. En plus de cette classification automatique, une classification manuelle a été effectuée pour identifier les profils SMP qui divergeaient visiblement des mesures manuelles. Un exemple de ce tri se retrouve à la figure 4. Ces profils divergents arrivent de façon récurrente lors des manipulations sur le terrain, et peuvent s'expliquer par la collision de la pointe avec une branche ou une malfunction de l'appareil.

À partir des paramètres L et F dérivés d'un modèle de structure à partir du signal enregistrés par l'appareil (voir Proksch 2015 [42]), un modèle statistique a été établi à partir d'une régression linéaire de manière à récupérer les propriétés microstructurales de la neige. Pour estimer la densité de la neige à partir





(a) Photographie de l'utilisation du SMP



(b) Photographie de l'utilisation du SMP

Figure 46 – L'appareil SMP pour une caractérisation de la microstructure de façon mécanique

du SMP, on considère la relation :

$$\rho_{SMP} = a_1 + a_2 \ln(\tilde{F}) + a_3 \ln(\tilde{F})L + a_4 L \quad (11)$$

où  $a_1 = 420.47 \pm 8.31 \text{ kg} \cdot \text{m}^{-3}$ ,

$$a_2 = 102.47 \pm 4.24 \text{ N}^{-1},$$

$$a_3 = -121.15 \pm 10.65 \text{ N}^{-1} \text{ mm}^{-1}, \text{ et}$$

$$a_4 = -169.96 \pm 18.70 \text{ mm}^{-1}.$$

Le paramètre de rayon optique des grains est également calculé à partir des mesures du SMP ( $R_{SMP}$ ), soit en combinant les deux relations suivantes :

$$R_{SMP} = \frac{3}{4} \frac{L_{exp}^{SMP}}{\rho_{Ice} - \rho_{SMP}} \quad (12)$$

où

$$L_{exp}^{SMP} = b_1 + b_2 L + b_3 \ln(\tilde{F}) \quad (13)$$

où  $b_1 = 0.0715 \pm 0.0058 \text{ mm}$ ,  $b_2 = 0.299 \pm 0.011 \text{ mm}^{-1}$ , et  $b_3 = 0.0149 \pm 0.0018 \text{ N}^{-1}$ .

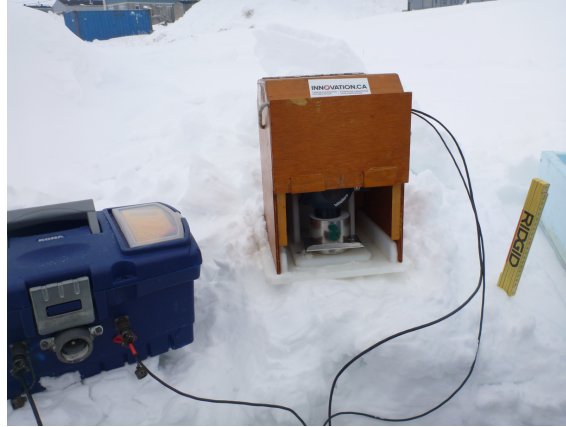
Ces mesures sur une échelle de 1.25 mm, nous permettent d'estimer la densité et la taille des grains sur une échelle bien plus fine que les mesures manuelles qui se limitent à un échantillonnage à tous les 5 cm (ou dans certains cas 3 cm).

Un seuillage est appliqué aux valeurs mesurées pour imposer des limites physiques aux densités et rayons optiques. Ainsi, la densité  $\rho_{SMP}$  est limitée par une borne supérieure de  $917 \text{ kg m}^{-3}$  (la densité de la glace pure  $\rho_{ice}$ ) et une borne inférieure de  $20 \text{ kg} \cdot \text{m}^{-3}$ , et la surface spécifique  $SSA_{SMP}$  est limitée à une borne supérieure de 125 et à une borne inférieure de  $2 \text{ m}^2 \cdot \text{kg}^{-1}$  (limite de précision de l'appareil).

### 7.3 IRIS

L'instrument IRIS (Shortwave InfraRed Integrating Sphere : Montpetit et al., (2012) [34]) est un instrument conçu à l'Université de Sherbrooke et utilisé pour mesurer la surface spécifique (SSA) de la neige. Le principe de cet appareil est de relier une mesure de l'albédo de la neige dans le proche infra-rouge, à une fréquence de 1330 nm à la SSA de la neige par la relation (eq. 14) suggérée par Kokhanovsky et Zege, 2004.[20]. Pour réaliser une mesure de l'albédo, on place les échantillons dans un compartiment de mesure où un laser infrarouge illumine un point de la surface neigeuse ciblée. La lumière diffusée dans toutes les directions est réfléchiée de façon uniforme dans une sphère intégrante et est mesurée par un détecteur photo-diode.

$$SSA = \gamma_{\lambda} \frac{6}{\rho_{ice}} \left( \frac{K_0(\xi)b}{\ln(R_{a,\lambda}(\xi))} \right)^2 \quad (14)$$



(a) Photographie du montage de IRIS1

Figure 47 – Photographie de l'appareil IRIS1 utilisé pour la réalisation des mesures de taille de grain. Un échantillon de neige sélectionné dans le cylindre métallique est placé dans le compartiment de mesure sous la sphère intégrante. Des versions plus récentes de cet appareil (IRIS2 et IRIS3) ont également été utilisées après une procédure de calibration complète.

Avant chaque utilisation de l'appareil, un étalonnage est réalisé par la mesure de la différence de potentiel aux bornes du détecteur photo-diode en plaçant des cibles SPECTRALON d'albédo connu devant la sphère intégrante. Une fois l'étalonnage complété, on place les échantillons de neige sélectionnés dans le manteau neigeux à l'aide d'un cylindre métallique dans le compartiment de mesure, sous la sphère intégrante pour faire une mesure. L'albédo  $R_{1330nm}$  est ensuite lié à la valeur de SSA avec l'aide de la relation (eq. 14). On obtient finalement une valeur de  $R_{opt}$  mesuré par IRIS ( $R_{IRIS}$ ) par l'équation  $R_{opt} = \frac{3}{\rho_{ice} * SSA}$ . Il a été démontré que cette procédure permet de modéliser adéquatement un paramètre de taille objectif

avec une grande précision et une excellente reproductibilité (Montpetit et al., 2012 [34])). Nous avons réalisé de nombreuses mesures de la taille des grains de neige avec cet instrument, situées à des valeurs de SSA comprises entre 8 et 65. La précision des mesures a été évaluée par la comparaison de l'instrument IRIS avec l'instrument FUFISSS, qui a donné pour un ensemble de 37 mesures, une relation linéaire avec un coefficient  $R^2 = 0.98$ . De plus, la répétabilité des mesures a été évaluée par des mesures successives de différents échantillons pris dans la même strate de neige, et donnait une écart type de l'ordre de 3% dans les valeurs de SSA pour un nombre de 5 ou 6 mesures.